

J. Feldhusen  
K.-H. Grote  
(Hrsg.)

# Pahl/Beitz Konstruktionslehre

Methoden und Anwendung  
erfolgreicher  
Produktentwicklung

8. Auflage



Springer Vieweg

---

# Pahl/Beitz Konstruktionslehre

---

Jörg Feldhusen • Karl-Heinrich Grote  
Herausgeber

# Pahl/Beitz Konstruktionslehre

Methoden und Anwendung erfolgreicher  
Produktentwicklung

8., vollständig überarbeitete Auflage 2013



Springer Vieweg

*Herausgeber*

Jörg Feldhusen  
Institut für Allg. Konstruktionstechnik  
RWTH Aachen  
Aachen  
Deutschland

Karl-Heinrich Grote  
Institut für Maschinenkonstruktion  
Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg  
Deutschland

ISBN 978-3-642-29568-3

ISBN 978-3-642-29569-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-29569-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe

Springer Science+Business Media

[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

## Vorwort zur 8. Auflage

Der „Pahl/Beitz“ hat sich über Jahrzehnte als Standardwerk im Studium und in der Praxis bewährt und etabliert und wurde in neun Sprachen übersetzt. Ashby bezeichnet das Buch als „The Bible – or perhaps more exactly the Old Testament – of the technical design field, developing formal methods in the rigorous German tradition“ Ashby 2007. Dieser Vorteil der Konstanz und Langlebigkeit des Werkes birgt die Gefahr, sich in das Gegen teil zu wandeln, wenn Neuerungen nicht berücksichtigt werden. Es ging niemals darum, kurzlebige Trends zu beschreiben und zu behandeln, vielmehr standen immer in der Praxis bewährte Methoden im Fokus. Die Grundlagen der Konstruktionstechnik wurden von Gerhard Pahl und Wolfgang Beitz Anfang der 1970er Jahre in einer Veröffentlichungsreihe in der Zeitschrift „Konstruktion“ gelegt. Viele Werkzeuge für den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, die heute selbstverständlich genutzt werden, steckten noch in den Kinderschuhen oder waren noch gar nicht erfunden. Gleiches gilt in ähnlicher Weise für die Aufgaben und Fragestellungen, die Ingenieurinnen und Ingenieure heute bearbeiten und lösen müssen.

Sowohl Gerhard Pahl als auch Wolfgang Beitz haben immer neue, in der Praxis bewährte Erkenntnisse in das Werk aufgenommen. Gleiches gilt für die Nachfolge-Mitautoren Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote, die allerdings erkannten, dass nach fast 40 Jahren das bis dahin tragfähige Konzept einer grundlegenden Neuerung bedurfte: Neue Aufgaben im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess und neue Werkzeuge zur Aufgabenbearbeitung haben die Konstruktionstätigkeit in der Praxis in den letzten Jahrzehnten stark verändert und müssen auch in der Lehre berücksichtigt werden.

Gleichzeitig ist das erforderliche Wissen für eine erfolgreiche Konstruktionstätigkeit so stark angewachsen, dass viele Fragestellungen nur von Spezialisten auf ihrem Gebiet bearbeitet werden können. Aus diesem Grund haben sich die Autoren dazu entschlossen, für die 8. Auflage die Rolle von Herausgebern zu übernehmen. Ein Teil der Inhalte der vorliegenden Auflage ist von den Herausgebern bearbeitet worden. Für viele Abschnitte der 8. Auflage des „Pahl/Beitz“ konnten zusätzlich herausragende Fachleute sowohl von anderen Hochschulen, aber insbesondere auch aus der Industrie gewonnen werden.

So wird es nach Meinung der Herausgeber gelingen, den Stand der Technik bei der Entwicklung und Konstruktion sowohl aus theoretischer, aber eben auch aus praktischer Sicht darzustellen.

Und schließlich: Wie im Ingenieurbereich, so sind auch für die 8. Auflage des „Pahl/Beitz“ immer Verbesserungsmöglichkeiten vorhanden; dies umso mehr aufgrund der vollkommenen Umstellung des Buches. In diesem Sinne sind wir, wie auch die weiteren Autoren der vorliegenden Auflage, für Anregungen dankbar.

Sicher wird der „Pahl/Beitz“ die Studierenden und die in der Praxis tätigen Ingenieurinnen und Ingenieure dabei unterstützen, ihre Aufgaben besser zu lösen.

Aachen, im Februar 2013

J. Feldhusen

Magdeburg, im Februar 2013

K.-H. Grote

---

## Danksagung

Die Herausgeber danken den Kolleginnen und Kollegen aus der Industrie und den Hochschulen für das große Engagement, mit dem die jeweiligen Buchabschnitte bearbeitet wurden. Ohne diese Beiträge wäre es nicht möglich gewesen, die 8. Auflage des „Pahl/Beitz“ auf einen so aktuellen und inhaltlich umfangreichen Stand zu bringen.

Besonderer Dank gilt auch den Herren Dr.-Ing. Nagarajah und Dr.-Ing. Schubert. In geduldiger und unermüdlicher Kleinarbeit haben sie viele Feinarbeiten erledigt und waren kompetenter Diskussionspartner bei inhaltlichen Fragen.

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Der Produktentstehungsprozess (PEP)

<b>1 Einleitung . . . . .</b>	5
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>2 Der Produktentstehungsprozess (PEP) . . . . .</b>	11
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>3 Die PEP-begleitenden Prozesse . . . . .</b>	25
Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Detlef Kochan, Christiane Beyer, Sándor Vajna, Gamal Lashin, Florian Kauf, Heinz Gaub, Mario Schacht und Patrick Erk	
<b>4 Technische Systeme . . . . .</b>	237
Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Jan Göpfert und Gerhard Tretow	

## Teil II Lösungsfundung

<b>5 Einleitung . . . . .</b>	283
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>6 Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses . . . . .</b>	291
Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Arun Nagarajah, Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> und Sandro Watzack	
<b>7 Hilfsmittel für die Entwicklung und Konstruktion . . . . .</b>	411
Gamal Lashin, Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	

## Teil III Produktgestaltung

<b>8 Einleitung . . . . .</b>	463
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	

<b>9 Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses .....</b>	465
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>10 Methodik des schrittweisen Gestaltens .....</b>	479
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>11 Grundregeln der Gestaltung .....</b>	493
Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote und Alfred Neudörfer	
<b>12 Gestaltungsprinzipien .....</b>	539
Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>13 Gestaltungsrichtlinien .....</b>	583
Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Jörg Heusel, Thomas Bronnhuber, Werner Hufenbach, Olaf Helms, Christopher Schlick, Fritz Klocke, Klaus Dilger und Rainer Müller	
<b>14 Qualitätssicherung in der Produktentwicklung und Konstruktion .....</b>	753
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>Teil IV Ansätze zur Rationalisierung in Entwicklung und Konstruktion</b>	
<b>15 Einleitung .....</b>	769
Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote	
<b>16 Grundsätzliche Überlegungen zur Rationalisierung .....</b>	773
Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote und Jörg Thon	
<b>17 Produktarten zur Rationalisierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses .....</b>	817
Thomas Vietor und Carsten Stechert	
<b>Sachverzeichnis .....</b>	873

---

## Autorenverzeichnis

**Wolfgang Beitz<sup>†</sup>**, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

**Christiane Beyer**, Associate Professor am Mechanical and Aerospace Engineering Department, California State University, Long Beach, 1250 Bellflower Boulevard, CA 90840-8305, Long Beach, USA  
E-Mail: cbeyer@csulb.edu

**Thomas Bronnhuber**, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen, Deutschland  
E-Mail: thomas.bronnhuber@de.trumpf.com

**Klaus Dilger**, Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, Deutschland  
E-Mail: k.dilger@tu-braunschweig.de

**Patrick Erk**, Grünecker Kinkeldey Stockmair & Schwahnhäusser, Kurfürstendamm 38/39, 10719 Berlin, Deutschland  
E-Mail: erk@grunecker.de

**Jörg Feldhusen**, Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

**Heinz Gaub**, Mitglied der Geschäftsleitung (bis 2011), DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Am DIN-Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, Deutschland  
E-Mail: gaub@alum.mit.edu

**Jan Göpfert**, ID-Consult GmbH, Irmgardstraße 1, 81479 München, Deutschland  
E-Mail: jan.goepfert@id-consult.com

**Karl-Heinrich Grote**, Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktions-technik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

**Olaf Helms**, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden, Holbeinstraße 3, 01307 Dresden, Deutschland  
E-Mail: j.o.helms@t-online.de

**Jörg Heusel**, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen, Deutschland  
E-Mail: joerg.heusel@de.trumpf.com

**Werner Hufenbach**, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden, Holbeinstraße 3, 01307 Dresden, Deutschland  
E-Mail: ilk@ilk.mw.tu-dresden.de

**Florian Kauf**, Hochschule Aalen - Technik und Wirtschaft, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen, Deutschland  
E-Mail: florian.kauf@htw-aalen.de

**Fritz Klocke**, Werkzeugmaschinenlabor, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: f.klocke@wzl.rwth-aachen.de

**Detlef Kochan**, Zentrum für Angewandte Forschung und Technologie e.V., Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01096 Dresden, Deutschland  
E-Mail: detlef.kochan@zaft.htw-dresden.de

**Gamal Lashin**, Vaillant Group, Berghauser Straße 63, 42859 Remscheid, Deutschland  
E-Mail: gamal.lashin@vaillant.de

**Rainer Müller**, ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Gewerbepark Eschberger Weg, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland  
E-Mail: rainer.mueller@mechatronikzentrum.de

**Arun Nagarajah**, Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: nagarajah@ikt.rwth-aachen.de

**Alfred Neudörfer**, Akademischer Direktor a. D., Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, Magdalenenstraße 2, 64289 Darmstadt, Deutschland  
E-Mail: a.neudoerfer@gmx.de

**Gerhard Pahl**, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

**Mario Schacht**, Geschäftsführer, Beuth Verlag, DIN Software GmbH, Am DIN-Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, Deutschland  
E-Mail: mario.schacht@din.de

**Christopher Schlick**, Institut für Arbeitswissenschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Bergdriesch 27, 52062 Aachen, Deutschland  
E-Mail: c.schlick@iaw.rwth-aachen.de

**Carsten Stechert**, Institut für Konstruktionstechnik (IK), Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, Deutschland  
E-Mail: c.stechert@tu-braunschweig.de

**Jörg Thon**, Stryker Trauma GmbH, Professor-Küntscher-Straße 1, 24232 Schönkirchen, Deutschland  
E-Mail: joerg.thon@stryker.com

**Gerhard Tretow**, ID-Consult GmbH, Irmgardstraße 1, 81479 München, Deutschland  
E-Mail: gerhard.tretow@id-consult.com

**Sándor Vajna**, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Institut für Maschinenkonstruktion, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: vajna@ovgu.de

**Thomas Vietor**, Institut für Konstruktionstechnik (IK), Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, Deutschland  
E-Mail: t.vietor@tu-braunschweig.de

**Sandro Wartzack**, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Martensstraße 9, 91058 Erlangen, Deutschland  
E-Mail: wartzack@mfk.uni-erlangen.de

---

# Teil I

## Der Produktentstehungsprozess (PEP)

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	5
	Literatur	10
<b>2</b>	<b>Der Produktentstehungsprozess (PEP)</b>	11
2.1	Der Prozess des Konstruierens (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)	11
	Literatur	23
<b>3</b>	<b>Die PEP-begleitenden Prozesse</b>	25
3.1	Das Projektmanagement (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)	26
3.1.1	Zeitliche und terminliche Planung	26
3.1.2	Kostenplanung des Projekts und Produkts	29
3.2	Effektive Organisationsformen (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)	31
3.2.1	Interdisziplinäre Zusammenarbeit	31
3.2.2	Führung und Teamverhalten	35
3.3	Risikomanagement (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)	36
3.3.1	Methoden zum Erkennen von Funktionsmängeln	39
3.4	Innovationspotenzial der Generativen Fertigung (Christiane Beyer, Detlef Kochan)	48
3.4.1	Grundprinzip der Generativen Fertigungsverfahren	49
3.4.2	Begriffe	51
3.4.3	Datenaustausch	52
3.4.4	Klassifikation der Generativen Fertigungsverfahren	56
3.4.5	Verfahrensbeschreibungen	57
3.4.6	Prozessketten beim Einsatz von Generativen Fertigungsverfahren	68
3.4.7	Anwendungsgebiete und Beispiele im Industriebereich	75
3.4.8	Erreichbare Effekte im Vergleich zu traditionellen Fertigungsverfahren	93
3.4.9	Ausblick	96

3.5	Produktdokumentation (Sándor Vajna) .....	99
3.5.1	Interne Technische Produktdokumentation.....	100
3.5.2	Externe Technische Produktdokumentation .....	101
3.5.3	Anforderungen an die Technische Produktdokumentation .....	101
3.5.4	Einfluss der Technischen Produktdokumentation auf das Unternehmen .....	103
3.5.5	Systeme für die interne und externe Technische Produktdokumentation .....	105
3.5.6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Einführung eines Technischen Produktdokumentationssystems .....	107
3.5.7	Zusammenfassung.....	110
3.6	Engineering Change Management (Gamal Lashin) .....	110
3.6.1	Einleitung .....	110
3.6.2	Stand der Standardisierung beim Engineering Change Management .....	113
3.6.3	Praxisbeispiel eines ECM-Prozesses .....	118
3.6.4	Messgrößen für den Prozess für den ECM-Prozess .....	122
3.6.5	Rechnerunterstützung für den ECM-Prozess.....	123
3.7	Kostenmanagement (Florian Kauf) .....	124
3.7.1	Einleitung .....	124
3.7.2	Produktkosten .....	125
3.7.3	Einflussfaktoren auf die Produktkosten .....	135
3.7.4	Produktkosten im Entwicklungsprozess .....	143
3.7.5	Zusammenfassung.....	152
3.8	Normung und Normen im Produktentstehungsprozess (Heinz Gaub, Mario Schacht) .....	152
3.8.1	Normung und Normen .....	155
3.8.2	Normenbereitstellung .....	172
3.8.3	Nutzen der Normung .....	179
3.8.4	Normung im Innovationsprozess .....	186
3.8.5	Normen und Patente .....	191
3.8.6	Normung als strategisches Instrument .....	194
3.9	Patente und gewerbliche Schutzrechte im Produktentstehungsprozess (Patrick Erk) .....	199
3.9.1	Einleitung .....	199
3.9.2	Grundlagen.....	200
3.9.3	Überblick über den Gewerblichen Rechtsschutz .....	201
3.10	Fertigungsplanung und Beschaffung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	224
	Literatur .....	226

<b>4 Technische Systeme . . . . .</b>	<b>237</b>
4.1 System, Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Einzelteil (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	238
4.2 Energie-, Stoff- und Signalumsatz (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	240
4.3 Funktionszusammenhang (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	242
4.3.1 Aufgabenspezifische Beschreibung . . . . .	242
4.3.2 Allgemein anwendbare Beschreibung . . . . .	246
4.4 Wirkzusammenhang (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	246
4.4.1 Bauzusammenhang . . . . .	251
4.4.2 Systemzusammenhang . . . . .	251
4.5 Produktarchitektur (Jan Göpfert, Gerhard Tretow) . . . . .	252
4.5.1 Grundlagen der Produktarchitektur . . . . .	255
4.5.2 Modulare und integrale Produktarchitekturen . . . . .	258
4.5.3 Die Gestaltung der Produktarchitektur . . . . .	264
Literatur . . . . .	278

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Das Werk „Pahl/Beitz“ ist seit über 30 Jahren erfolgreich am Markt, mittlerweile in acht Sprachen übersetzt worden und wird von vielen Quellen als das Standardwerk auf dem Gebiet der Konstruktionsmethodik bezeichnet, auch von solchen, die sich nicht vordergründig mit Konstruktionstechnik befassen. So bezeichnet Ashby den Pahl/Beitz als „The Bible – or perhaps more exactly the Old Testament – of the technical design field, ...“ (Ashby 2007). In der zitierten Bemerkung „more exactly the Old Testament“ liegt allerdings auch der Grund für die vorliegende komplette Überarbeitung des Buches. Die seinerzeit erarbeiteten Grundlagen des Konstruierens haben dennoch auch heute noch ihre Gültigkeit.

In den letzten 10 Jahren hat sich in der produzierenden Industrie ein starker Wandel vollzogen. Die politischen Veränderungen zum Ende des 20. Jahrhunderts führten zur Globalisierung und in deren Folge zu neuen Märkten, aber auch zu neuen Wettbewerbern für etablierte Unternehmen. Diese neue Wettbewerbssituation führte im Resultat dazu, dass die Unternehmen durch *Diversifizierung* ihrer angestammten Produkte versuchten, Marktanteile zu halten oder möglichst neue dazuzugewinnen. Es werden also Produkte in immer neuen Varianten dem Markt angeboten, wodurch die Komplexität in den Unternehmen deutlich zugenommen hat.

Ein weiterer Wettbewerbsfaktor ist der *Innovationsgrad* der Produkte. Innovationen werden in der heutigen Produktentwicklung überwiegend durch Software- und

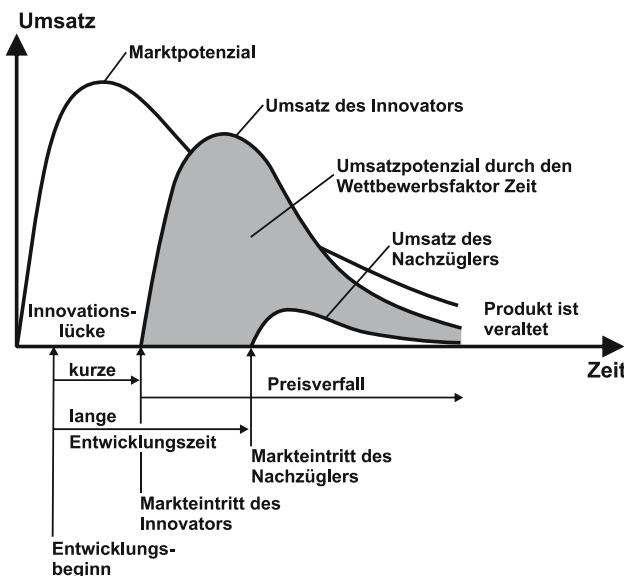
---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische  
Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

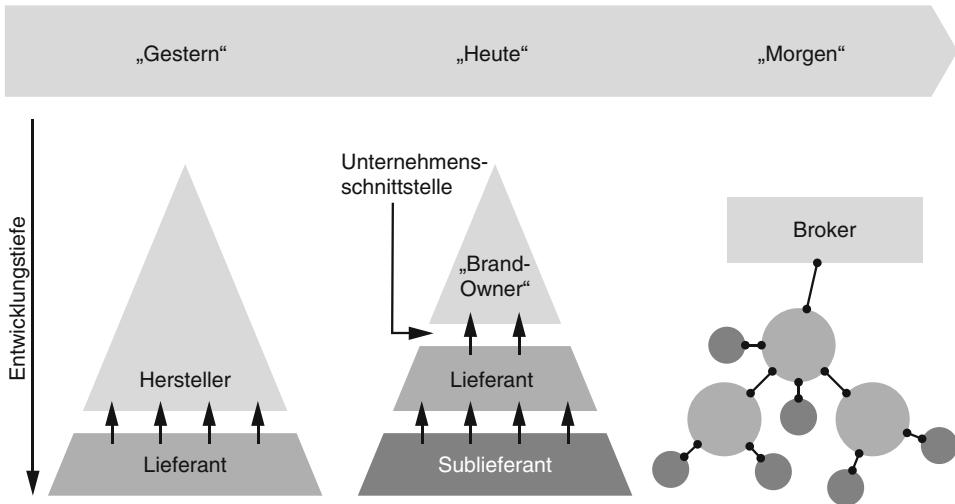


**Abb. 1.1** Bedeutung von „Time to Market“ (Kramer und Kramer 1997)

Elektronikkomponenten realisiert (Wallentowitz et al. 2009). Die Möglichkeiten der Elektronik in Kombination mit Software zur Steuerung und Regelung von Abläufen haben unter dem Begriff „Mechatronik“ das Verhältnis zwischen der Mechanik und den elektrischen/elektronischen Komponenten eines Produkts deutlich verschoben. War der Anteil der Elektrik/Elektronik im PKW-Bereich vor 30 Jahren noch unter 10 %, so beträgt er heute über 30 % (Zohm 2004). Noch extremer sind die Verhältnisse bei vielen anderen Konsumgütern, wie beispielsweise Kameras. Hier hat bekanntermaßen ein vollkommener Wechsel von der analogen hin zur digitalen Technik stattgefunden. Die steigende Integration der Elektrik/Elektronik und der Software in diese Produkte führt zu einer weiteren Steigerung der *Komplexität*.

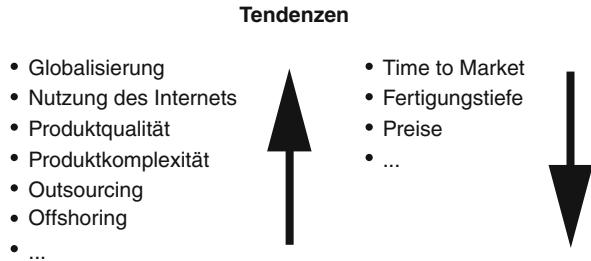
Für die Beherrschung der Komplexität steht den Unternehmen aber immer weniger Zeit zur Verfügung. Aufgrund der durch die Wettbewerbssituation hervorgerufenen drastischen Reduzierung der Verweildauer von Produkten am Markt wird die *Entwicklungszeit* immer mehr zum entscheidenden Wettbewerbsvorteil für Unternehmen. Die Unternehmen können durch einen schnelleren Markteintritt („Time to Market“) mit innovativen Produkten einen höheren Umsatz generieren als ihre Nachfolger (s. Abb. 1.1).

Ein weiterer entscheidender Wettbewerbsfaktor, der die Situation für die Unternehmen noch weiter verschärft, ist die Kostenreduktion. In gesättigten Märkten müssen innovative Produkte effizient entwickelt werden. Zum Lösen dieses Dilemmas optimieren die Unternehmen zum einen ihre Prozesse, um die Abläufe und den Ressourceneinsatz effizient gestalten zu können, und zum anderen arbeiten sie zunehmend in Engineering- und Fertigungsnetzwerken. Das bedeutet, sowohl die Fertigungstiefe als auch die Entwicklungstiefe eines Unternehmens reduzieren sich. Das Unternehmen wird zunehmend zur Manage-



**Abb. 1.2** Trends von Unternehmensformen

**Abb. 1.3** Tendenzen der Randbedingungen für Unternehmen



mentbasis, um die Beteiligten zu koordinieren. In Abb. 1.2 sind die typischen Formen für heutige Unternehmen und zukünftige Tendenzen dargestellt, siehe auch Abb. 1.3.

Die zeitliche Zuordnung der einzelnen Formen von Produzenten ist hier nicht absolut, sondern vielmehr relativ im Sinne eines Schwerpunkts gemeint. So gibt es heute natürlich noch Hersteller, wie sie auf der linken Seite der Abbildung wiedergegeben sind. Das bedeutet, die Fertigungstiefe, also der Umfang der im eigenen Unternehmen produzierten Komponenten für ein Produkt, ist relativ hoch. Von externen Lieferanten werden beispielsweise Baugruppen für ein Produkt bezogen. Insbesondere durch die Globalisierung haben sich heute vielfach Unternehmensformen herausgebildet, die in der Mitte der Abbildung wiedergegeben sind. Die oben beschriebene Fertigungstiefe im Unternehmen ist relativ gering. Ein häufiger Grund hierfür ist die Beschaffung von Komponenten in den Abnehmerländern, um beispielsweise kostengünstig produzieren zu können oder weil das Produkt sonst nicht auf dem anvisierten Markt akzeptiert werden würde. Häufig ist auf solchen Produkten der Hinweis „Made by ...“ im Gegensatz zu „Made in ...“ zu finden.

Einen weiteren Schritt bezüglich der Reduzierung der Fertigungstiefe stellt der „Broker“ dar gestellt, auf der rechten Seite der Abbildung. Dieser Extremfall eines Unternehmens wird häufig sogar nur von einer Person gebildet. Diese sucht sich für die Umsetzung ihrer Produktidee entsprechende Partner. Ein Unternehmen im klassischen Sinn ist dies also nicht.

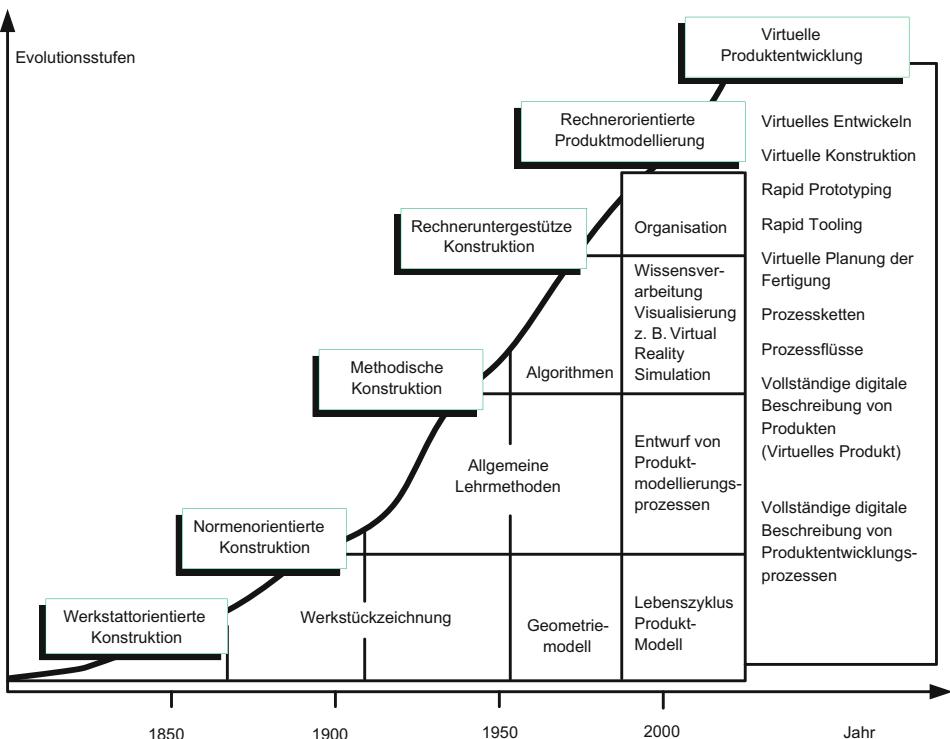
Das oben erwähnte Arbeiten in Engineering- und Fertigungsnetzwerken hat ein Outsourcen, also die Vergabe von Aufgaben an räumlich nahe gelegene Dienstleister, bzw. ein Offshoring, die Vergabe von Aufgaben an räumlich sehr fern gelegene Dienstleister, zur Folge. Die Verlagerung der Aufgaben erfolgt dabei entweder um Kosten zu sparen, oder weil die erforderlichen Kompetenzen und Fähigkeiten im eigenen Unternehmen nicht vorhanden sind (Hauschildt und Salomo 2007).

Heute sind also neben den nach wie vor notwendigen Fähigkeiten eines Unternehmens zur Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Produkten neue Fähigkeiten gefragt. Diese beziehen sich auf die Beherrschung von Komplexität, die die Produkte einerseits selbst betrifft, aber zum großen Teil auch aus der Vernetzung mit Partnern resultiert. Ein Unternehmen muss in der Lage sein, unternehmensübergreifende Projekte und Prozesse zu beherrschen und dabei die entstehenden Daten und Informationen gezielt steuern zu können.

Ein weiterer bedeutender Aspekt, der zu einer Umwälzung hinsichtlich der Aufgaben im Engineering-Bereich geführt hat, ist die rasante Entwicklung der Informationstechnologie. Die Leistungsfähigkeit der Hard- und Software hat zwischenzeitlich ein Niveau erreicht, das vollkommen neue Arbeitstechniken für Ingenieure zulässt. Nicht nur die Modellierung der Geometrie mittels CAD-Systemen (Computer Aided Design), insbesondere die Simulation von Produkteigenschaften mit Hilfe des Rechners, hat entschiedene Fortschritte erfahren. Softwaresysteme zur Mehrkörpersimulation (MKS) sowie die Finite-Elemente-Methode (FEM) beispielsweise werden heute standardmäßig zur Absicherung der Entwicklungen und Konstruktionen eingesetzt. Diese Entwicklung wird als „Virtuelle Produktmodellierung“ bezeichnet. In Abb. 1.4 ist die Historie der Entwicklungs- und Konstruktionshilfsmittel wiedergegeben.

Parallel zu der geschilderten Entwicklung auf Seiten der Entwicklung und Konstruktion sind an der Schnittstelle zwischen der Konstruktion und der Fertigung ebenfalls neue Methoden eingeführt worden. Hierzu gehört z. B. das Rapid-Prototyping oder das Rapid- bzw. Soft-Tooling. Beide Verfahren nutzen die in der Konstruktion mit Hilfe von CAD erzeugten Daten, um einen ersten physikalischen Abgleich zwischen dem rechnerinternen und einem physikalischen Modell vornehmen zu können.

All diese Punkte haben dazu geführt, dass sich das Aufgabenspektrum von Ingenieuren seit der ersten Auflage des Pahl/Beitz in der Praxis sehr stark gewandelt hat. Deshalb werden in dieser 8. völlig überarbeiteten Auflage neue Themen behandelt und diejenigen der früheren Auflagen den vorhandenen Bedürfnissen angepasst. Hierbei werden aber nur diejenigen Aspekte betrachtet, die sich in der Praxis bereits als Standardaufgabenstellung herausgestellt haben. Um den aktuellen Herausforderungen in der Praxis gerecht zu werden, ist das Werk in vier Hauptabschnitte unterteilt:



**Abb. 1.4** Historie der Entwicklungs- und Konstruktionshilfsmittel (nach Spur und Krause 1997)

**Teil 1** Befasst sich mit den *Voraussetzungen* für die Entwicklung und Konstruktion, also welche Einflüsse und Randbedingungen typischerweise zu beachten sind. Dabei werden die unterschiedlichen Voraussetzungen in verschiedenen Arten von Unternehmen betrachtet: bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU), deren Produkte in kleinen Stückzahlen hergestellt werden; bei Großunternehmen, den sog. OEMs (Original Equipment Manufacturer), welche in Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen (Zulieferer) ein Gesamtprodukt erstellen. Es wird auf den *Produktentstehungsprozess* (PEP) und seine wesentlichen Teilprozesse eingegangen. Ebenfalls werden das Produkt selbst und die unterschiedlichen Sichten auf ein Produkt behandelt; den Schwerpunkt bildet dabei die *Produktarchitektur*. Anschließend behandeln die Autoren die *virtuelle Produktentwicklung*, also die Modellierung des Produkts und seiner Eigenschaften mit Hilfe von Hard- und Software.

**Teil 2** Geht auf die *Lösungsmethoden* ein. Hier wird, entsprechend dem heutigen Vorgehen in der Praxis, unterschieden zwischen dem „problemorientierten Vorgehen“ (auch als Forschungs- oder Innovationstätigkeit bezeichnet) und dem „lösungsorientierten Vorgehen“ (ausgerichtet an bereits vorhandenen Lösungen). Das problemorientierte Vorgehen entspricht dabei dem Vorgehen der Konstruktionsmethodik. Da der Anteil der Innovati-

tionstätigkeiten sich in der Praxis auf ca. 6 % bis ca. 9 % beschränkt (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH 2011), soll hier das lösungsorientierte Vorgehen im Vordergrund stehen. Hierfür sind in der Literatur nur sehr wenige Hinweise vorhanden. Im Rahmen der Lösungsfindung wird auch auf die *Bewertungsprozesse* als Basis für eine nachvollziehbare Entscheidung eingegangen. Die *Dokumentation* der Ergebnisse des Engineering-Prozesses bildet den Abschluss von Teil 2. Dazu werden, soweit nicht bereits in Teil 1 erfolgt, die heutigen *Methoden der Rechnerunterstützung* in Form eines digitalen Archivs angesprochen. Gleichfalls wird auch auf die heute übliche Rolle von *ERP-Systemen* (Enterprise Ressource Planning System) und als Unterseite auf das *PPS* (Produktionsplanungssystem) eingegangen.

**Teil 3** Behandelt die *Regeln zur Gestaltung* von Bauteilen, Baugruppen und des ganzen Produkts. Hier werden die aus dem bisherigen Pahl/Beitz bekannten Grundregeln zur Gestaltung, die Prinzipien und die Gestaltungsrichtlinien auf die heutigen Fertigungsmöglichkeiten abgestimmt präsentiert.

**Teil 4** Behandelt mit der *Rationalisierung des technischen Bereichs* eines Unternehmens ein Gebiet, das in den letzten Jahren sehr stark an Bedeutung gewonnen hat. Im Mittelpunkt steht dabei die *Gestaltung der Produkte*. In Abhängigkeit von der Produktarchitektur wird dann auf die adäquaten *Engineering-Prozesse* eingegangen. Neben den seit Langem eingeführten Ansätzen wie Baureihen und Baukästen wird auch auf neuere Ansätze wie Module und Features sowie Referenzvarianten eingegangen. Es wird ebenfalls erläutert, wie mit Hilfe der Rechnerunterstützung ein *Konfigurationsmanagementsystem* aufgebaut werden kann.

---

## Literatur

- Ashby MF (2007) Materials selection in mechanical design, 3. Aufl. Elsevier, München
- Hauschildt J, Salomo S (2007) Innovationsmanagement. 4., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Vahlen, München
- Kramer F, Kramer M (1997) Bausteine der Unternehmensführung. Kundenzufriedenheit und Unternehmenserfolg. Springer, Berlin
- Spur G, Krause F-L (1997) Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. Hanser, München
- Wallentowitz H, Freialdenhoven A, Olschewski I (2009) Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (2011) Innovationen Branchenreport: Ergebnisse der deutschen Innovationserhebung 2011. Jahrg. 19, Nr. 8, Januar 2012. ZEW, Mannheim
- Zohm F (2004) Management von Diskontinuitäten: das Beispiel der Mechatronik in der Automobilzulieferindustrie. Gabler, Wiesbaden

---

# Der Produktentstehungsprozess (PEP)

2

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Die industrielle Herstellung von Produkten hat bereits sehr früh zu einer Arbeitsteilung im Rahmen der Produktentstehung geführt. Dieses als „Taylorismus“ bezeichnete Phänomen beschreibt die „... systematische Umgestaltung der Arbeit, vor allem in der Form der Spezialisierung (Arbeitsteilung) und Verdichtung“ (Luczak 1993). Hiervon ist auch die Entwicklung und Konstruktion betroffen. Ein Produkt entsteht also nicht in einem einzigen, großen Schritt, vielmehr in vielen kleinen Schritten, deren Inhalte genau festgelegt und deren Schnittstellen untereinander genau beschrieben sein müssen. Die so entstehende Abfolge von Arbeitsschritten wird als „Prozess“ bezeichnet (EN ISO 9000 2005). Die Gesamtheit aller Prozessschritte wird als „Produktentstehungsprozess“ (PEP) bezeichnet. Er fasst mehrere Arbeitsschritte zum Erreichen eines Teilergebnisses zusammen, von der Produktidee bis zum fertigen Produkt. Im Folgenden sollen einige Grundüberlegungen dargestellt werden. Zum einen warum es überhaupt möglich ist ein physikalisches Produkt gedanklich vorauszuplanen, und zum anderen welche grundsätzlichen Überlegungen es zum Aufbau des PEP bisher gegeben hat.

---

## 2.1 Der Prozess des Konstruierens (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Der deutsche Begriff „konstruieren“ stammt vom Lateinischen „construere“ ab, was mit „aufbauen“ oder „errichten“ übersetzt werden kann. Zu Beginn der Industrialisierung wurden die Produkte von ein und derselben Person erdacht und hergestellt. Überlegun-

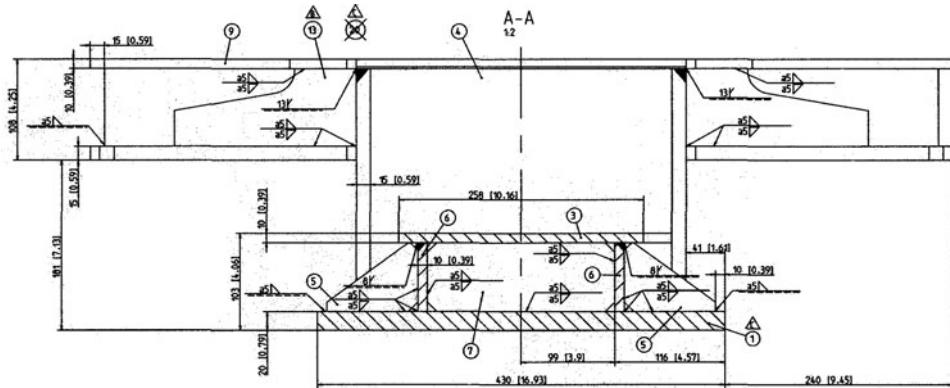
---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische  
Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de



**Abb. 2.1** Modellhafte Abbildung der Geometrie eines Bauteils (Schweißkonstruktion) durch eine Zeichnung

**Abb. 2.2** Ein Arbeitsschritt beim Konstruieren



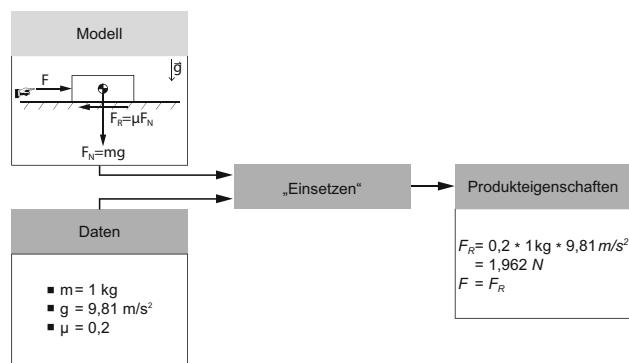
gen zur Gestaltung wurden also direkt in Bauteile umgesetzt. Die oben angesprochene Arbeitsteilung zwischen dem „Erdenken“ eines Produkts und dessen Herstellung machte eine modellhafte Abbildung der Überlegungen zur Gestaltung des Produkts erforderlich. Zur modellhaften Abbildung der dreidimensionalen Geometrie eines Bauteils werden bis heute zweidimensionale Zeichnungen nach genauen Regeln erstellt, s. Abb. 2.1.

Die verschiedenen Eigenschaften eines Produkts werden mit Hilfe sehr unterschiedlicher Modelle wiedergegeben: die Geometrie über Zeichnungen, die Festigkeit über entsprechende Werkstoffgesetze usw. Der Erfolg beim Konstruieren hängt demnach sehr stark von der Wahl des richtigen Modells ab. Um eine Produkteigenschaft spezifisch, also für den gerade betrachteten Fall voraussagen zu können, müssen die allgemeingültigen Modelle mit den für die Anwendung spezifischen Daten versehen werden. In einer Zeichnung beispielsweise sind dies die genauen Abmaße, bei einem Werkstoffgesetz die genauen Werte für die Zugfestigkeit des gewählten Werkstoffs. Ein Arbeitsschritt beim Konstruieren besteht dann darin, das betreffende Modell, welches die betrachtete Eigenschaft abbilden kann, mit den aufgabenspezifischen Werten zu versorgen und zu verarbeiten, um die gesuchte Produkteigenschaft ermitteln zu können. Sehr häufig bedeutet dies beispielsweise, eine Formel (Modell) mit Werten (Daten) zu füllen und auszurechnen, s. Abb. 2.2. In dieser Abbildung ist der Arbeitsschritt als (Arbeits-) Methode bezeichnet.

Abbildung 2.3 zeigt eine mögliche Anwendung eines einfachen Modells zur Modellierung der Reibkräfte eines Bauteils.

Damit ein Produkt entsteht, muss natürlich eine ganze Reihe solcher kleiner Arbeitsschritte vollzogen werden. Letztlich ist es notwendig, jede Eigenschaft des Produkts durch

**Abb. 2.3** Ein Arbeitsschritt beim Konstruieren am Beispiel „Reibkraft bestimmen“

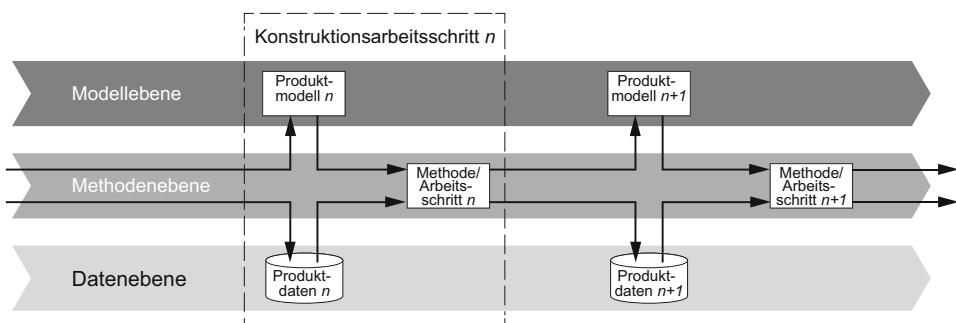


ein entsprechendes Modell mit den zugehörigen Daten in einem Arbeitsschritt nach Abb. 2.2 zu ermitteln. Durch die Summe all dieser Arbeitsschritte wird ein Produkt in all seinen Eigenschaften modellhaft abgebildet. Die Summe aller Arbeitsschritte von der Produktidee bis zur Erzeugung der Fertigungsunterlagen wird als *Entwicklungs- und Konstruktionsprozess* (EKP), bezeichnet. In Abb. 2.4 ist der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess basierend auf den angeführten Überlegungen ausschnittsweise dargestellt. Dabei ist ein Konstruktionsarbeitsschritt  $n$ , wie er in der Abb. 2.2 dargestellt ist, gekennzeichnet.

Die *produktbeschreibenden Daten*, die bei der Bearbeitung eines Modells verwendet werden, können, wie z. B. Werkstoffdaten, von außerhalb des Prozesses stammen und werden dann im Rahmen der Bearbeitung der EK-Aufgabe festgelegt. Solche Daten werden als prozesseexterne Daten bezeichnet (Feldhusen 1989). Typischerweise entstehen produktbeschreibende Daten aber auch im Prozess selbst als Ergebnis der Verarbeitung eines Modells. Diese Daten werden dann als prozessinterne Daten bezeichnet (Feldhusen 1989). Der EKP kann demnach in seiner abstraktesten Form folgendermaßen beschrieben werden:

### Hauptaussagen

- Beim Entwickeln und Konstruieren werden die Produkteigenschaften mit Hilfe von Modellen und Daten abgebildet.



**Abb. 2.4** Ausschnitt aus dem Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, wie er durch die entsprechende Abfolge von produktbeschreibenden Modellen und definierenden Daten entsteht

- Für jede Produkteigenschaft, jeden Prozessschritt gibt es spezifische Modelle ( $M_n$ ).
- Zur Erzeugung und Bearbeitung der Modelle ( $M_n$ ) werden Methoden ( $AS_n$ ) benötigt.
- Ziel des Konstruktionsprozesses ist der Aufbau des Produktdatenmodells (PDM), das alle Eigenschaften, technische und wirtschaftliche, eines Produkts festlegt.
- Die allgemeingültigen Modelle ( $M_n$ ) werden durch Anwendung von produktsspezifischen Daten ( $P_n$ ) zu Produktmodellen ( $PM_n$ ).

Damit kann das Entwickeln und Konstruieren folgendermaßen beschrieben werden:

Entwickeln und Konstruieren ist die Überführung des Modells ( $M_n$ ) der Phase  $n$  in das Modell ( $M_{n+1}$ ) der Phase  $n + 1$  unter Anwendung der Methoden ( $AS_n$ ) und der Produktdaten ( $P_n$ ). Dabei werden die Produktdaten ( $P_{n+1}$ ) erzeugt, s. Abb. 2.4.

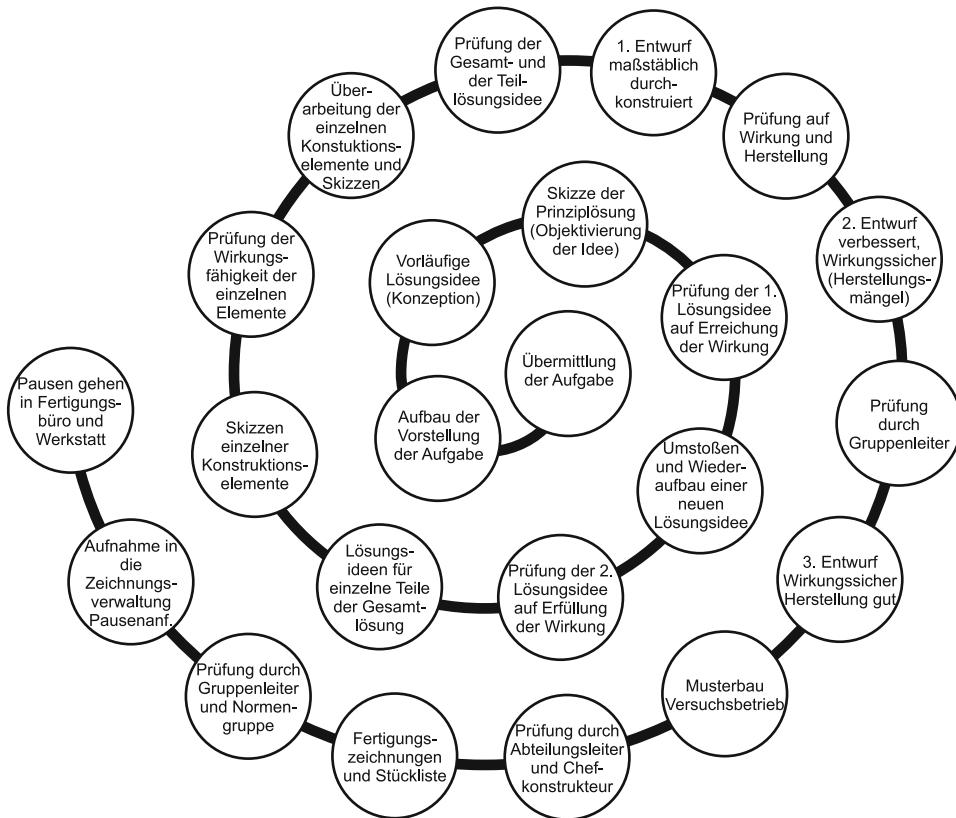
Zusammen mit den einzelnen Arbeitsschritten zur Herstellung der Komponenten wie Bauteile und Baugruppen und deren Montage zum Gesamtprodukt wird so in der Summe aller Arbeitsschritte der PEP gebildet.

Der PEP erfordert also, wie jeder Prozess, Mittel und Tätigkeiten in einer ausreichenden Menge (Lindemann 2005). Zu den Mitteln können z. B. die ausführenden Mitarbeiter gehören, Einrichtungen wie CAD- oder Fertigungsanlagen usw. Erforderlich sind außerdem Methoden zur Nutzung der Mittel.

Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess ist in Abhängigkeit von der Komplexität des Produkts, auf den er sich bezieht, häufig selbst sehr komplex. Seit Ende des neunzehnten Jahrhunderts wurden deshalb Anstrengungen unternommen, diesen Prozess zu systematisieren und mit Hilfe von unterstützenden Arbeitstechniken, den Methoden, zielgerichtet ausführen zu können. So wurde im Laufe des zwanzigsten Jahrhunderts eine Konstruktionsmethodik entwickelt, die dies leisten soll und kann. Die folgende Darstellung der Entwicklung der Konstruktionsmethodik stellt eine Zusammenfassung von Bender (2004, Kapitel 2) dar. Eine sehr gute und ausführliche Darstellung findet sich auch in Heymann (2005). Bereits sehr früh wurde versucht, einen allgemein gültigen EKP modellhaft abzubilden. Die ersten Überlegungen hierzu machte Reuleaux (1875) zum Ende des neunzehnten Jahrhunderts. Er stellte ein modellhaftes Verfahren zur kinematischen Synthese vor. Erste Ansätze zu einem systematisch strukturierten EKP hat Wögerbauer geliefert (Wögerbauer 1943). Er betont bereits die Bedeutung einer geklärten Aufgabenstellung und geht von mehreren Lösungsalternativen sowie einer Lösungsauswahl auf Basis einer Bewertung aus, s. Abb. 2.5.

Mit den Hauptschritten seines Modells des Entwickelns und Konstruierens nennt er im Wesentlichen bereits die Hauptschritte des späteren Modells des EKP. Zusammenfassend kommen dabei folgende Hauptarbeitsschritte vor:

- Aufgabe *klären*,
- Lösungsidee *entwickeln*,
- *Bewerten* der Lösung,
- *Verbessern* der Lösung und
- *Erstellen* der Herstellungsunterlagen.



**Abb. 2.5** Konstruktionsprozess nach Wögerbauer (1943)

Wögerbauer beschreibt mit seinem Prozessmodell die wesentlichen Arbeitsschritte der Konstruktionstechnik, die sich zusammenfassen lassen als:

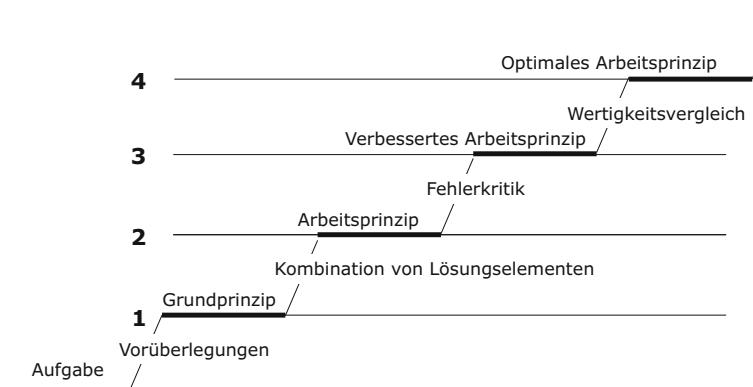
„Vom WAS zum WIE“

Wesentliche Erkenntnisse der Konstruktionsmethodik finden sich jedoch noch nicht in seinem Prozessmodell. Insbesondere fehlen noch folgende Arbeitsschritte:

- Die *lösungsneutrale* Beschreibung der *Aufgabenstellung*,
- Die *systematische Lösungsentwicklung*, z. B. auf Basis physikalischer Zusammenhänge,
- Die *systematische* Erzeugung von *Lösungsalternativen* und
- die *systematische* Bewertung der Lösungsalternativen.

Einen ähnlichen Ansatz wie Wögerbauer hat Kesselring (1954). Er fokussiert in seinem Prozessmodell auf drei Aspekte:

- Die *Erfindungslehre*: In diesem Prozessabschnitt wird die Lösung für ein technisches Problem generiert. Hierfür werden Wege zur gezielten Gewinnung von Erfindungen beschrieben.



**Abb. 2.6** Hauptprozessschritte nach Hansen (1965)

- Die *Gestaltungslehre*: Dies ist der Prozessabschnitt, innerhalb dessen das Konzept auf Basis von Gestaltungsprinzipien konstruktiv ausgeführt wird.
- Die *Formungslehre*: Dieser Prozessabschnitt dient der wirtschaftlichen Betrachtung der Konstruktion.

Kesselring schlägt also, insbesondere durch die „Formungslehre“, Prozessabschnitte des EKP vor, wie sie auch heute einen Schwerpunkt bei der Konstruktion bilden.

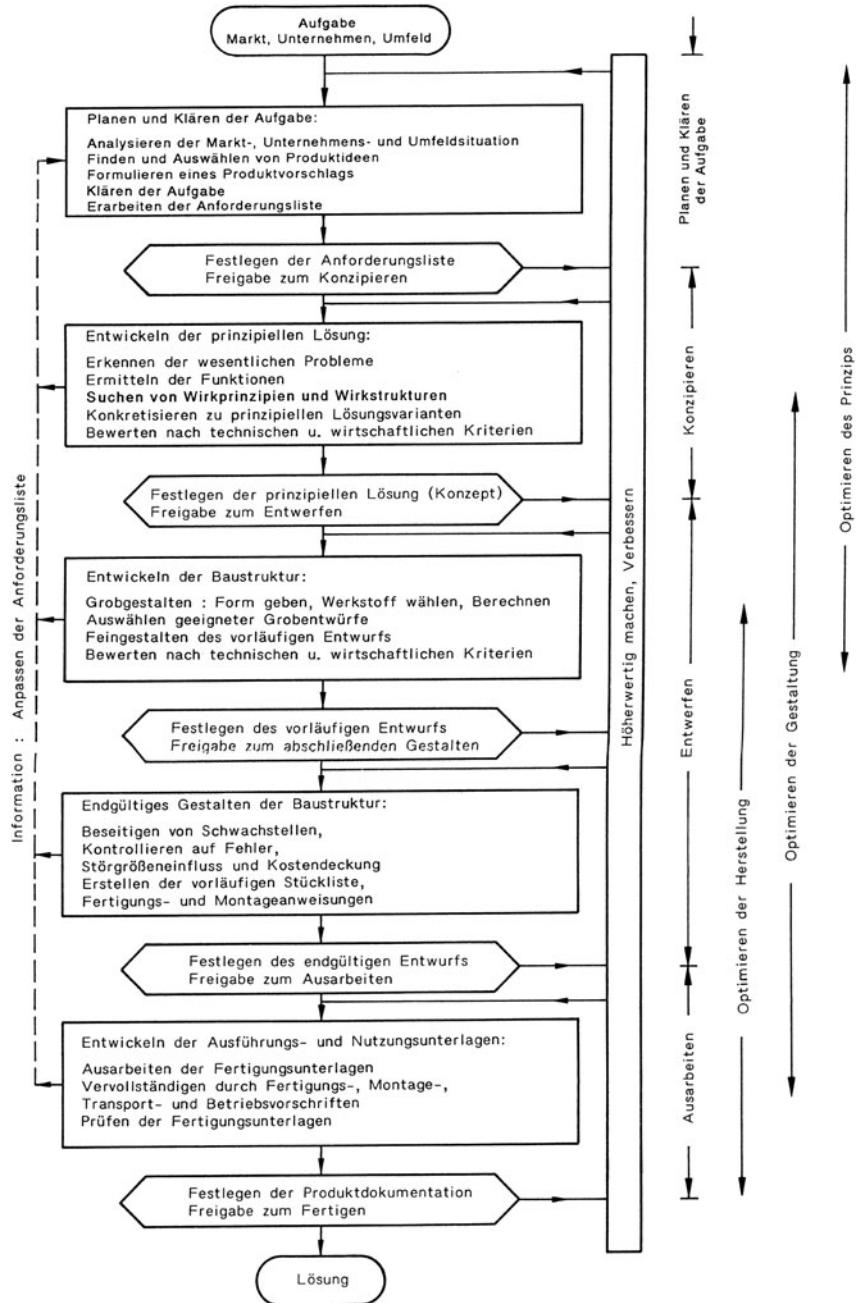
Hansen (1965) schließlich sieht die systematische Lösungsentwicklung und -erweiterung als Prozessschritte vor, s. Abb. 2.6. Damit legt er die wichtigen Grundlagen der Konstruktionsmethodik.

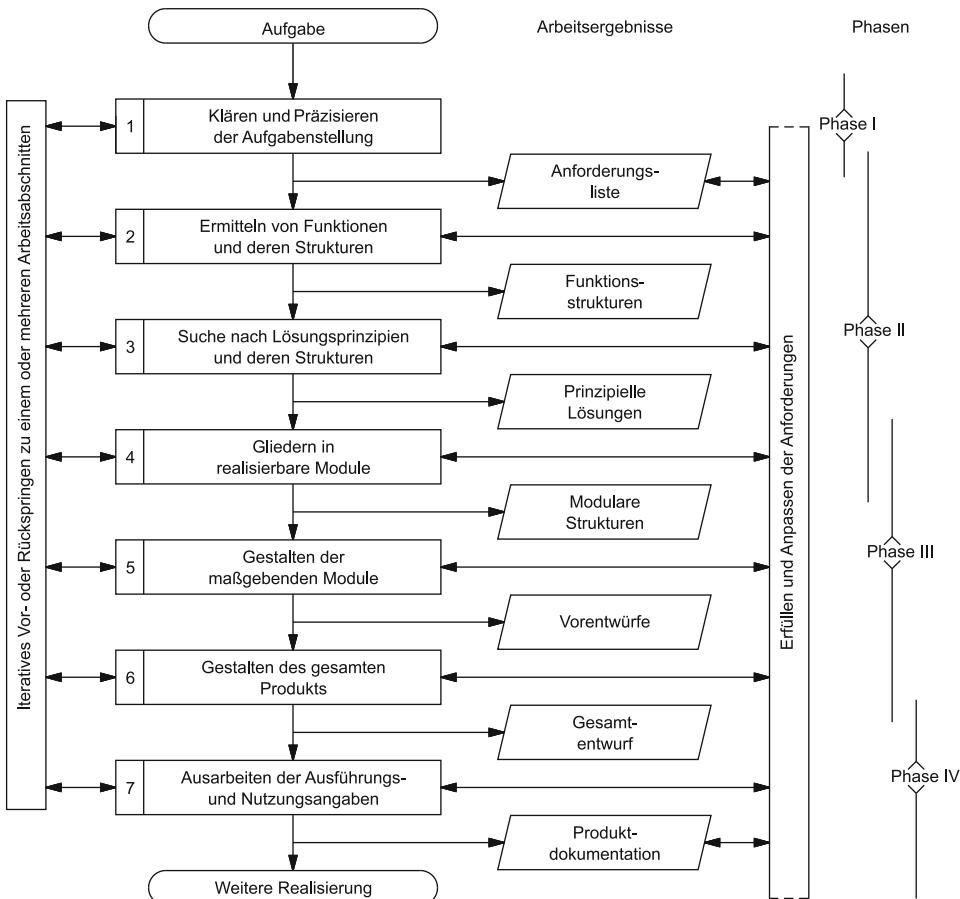
Aufbauend auf diesen Erkenntnissen haben dann ab ca. 1970 Rodenacker (1991), Roth et al. (1971), Hubka (1976), Koller (1976) und Pahl und Beitz (1977) die einzelnen Arbeitsschritte des EKP in sehr ähnlicher Weise definiert.

Beispielhaft für diese entwickelten Prozessmodelle soll hier das Modell von Pahl und Beitz (1977) wiedergegeben werden (s. Abb. 2.7), das sich in verschiedene Hauptarbeits schritte gliedert.

Diese verschiedenen Prozessmodelle fanden dann Eingang in der VDI 2221 (1986). In ihr wurden erstmalig die bisherigen Erkenntnisse zum EKP in einem allgemeingültigen Prozessmodell des Entwickelns und Konstruierens zusammengefasst, s. Abb. 2.8.

Sowohl Abb. 2.7, insbesondere aber der Prozess nach der VDI 2221 (1993), s. Abb. 2.8, machen deutlich, dass der EKP normalerweise nicht innerhalb eines Durchlaufs zu befriedigenden Ergebnissen führt. Häufig müssen erste Ergebnisse verbessert und korrigiert werden. Dieses „iterative Vor- und Rückspringen“, wie es in Abb. 2.8 dargestellt ist, spiegelt indirekt den notwendigen Kontrollprozess als einen Teil des EKP wieder. Es ist also erforderlich, in möglichst kurzen Abständen (kurzer Regelkreis) die Ergebnisse daraufhin zu prüfen, ob sie den geforderten Vorgaben entsprechen.

**Abb. 2.7** Hauptprozessschritte des EKP nach Pahl und Beitz (1977)

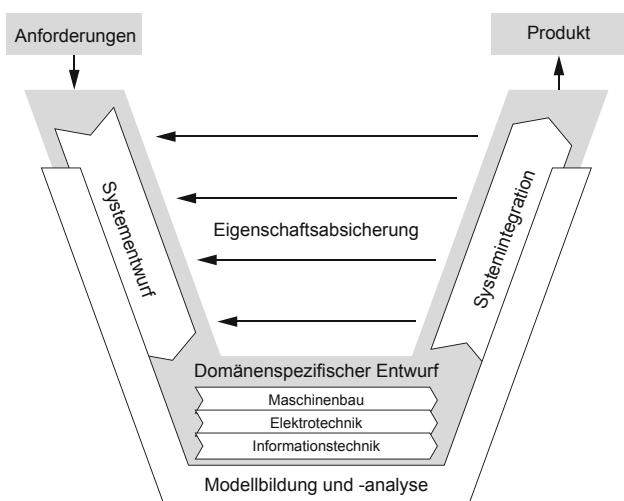


**Abb. 2.8** Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221 1993)

Dieses Vorgehen wurde zu Beginn der 1990er Jahre insbesondere in der Softwareentwicklung zum Standard und hat auch im Maschinenbau Eingang gefunden. In Abb. 2.9 ist dieses sog. *V-Modell des EKP* für die Mechatronik nach VDI 2206 (VDI-Richtlinie 2206 2004) wiedergegeben. Die dort dargestellte „Eigenschaftsabsicherung“ entspricht dabei dem oben beschriebenen Kontrollprozess und sorgt für einen kurzen Regelkreis.

Es gibt aber einen weiteren Aspekt im Rahmen der Produktentwicklung und Konstruktion, der nur sehr unzureichend bei den bisher dargestellten Prozessmodellen berücksichtigt ist. Es handelt sich dabei um die Abhängigkeit der Entwicklungs- und Konstruktionsergebnisse von den vorgefundenen Rahmen- und Randbedingungen. Beispielsweise muss häufig bereits eingekauftes und sonst nicht verwendbares Material wenn möglich bei einem aktuellen Projekt genutzt werden. Dies führt evtl. zu einer nicht optimalen Gestaltung, ist aber wirtschaftlich für das Unternehmen von Vorteil. Man kann also feststellen:

**Abb. 2.9** Modell des EKP  
(VDI-Richtlinie 2206 2004)



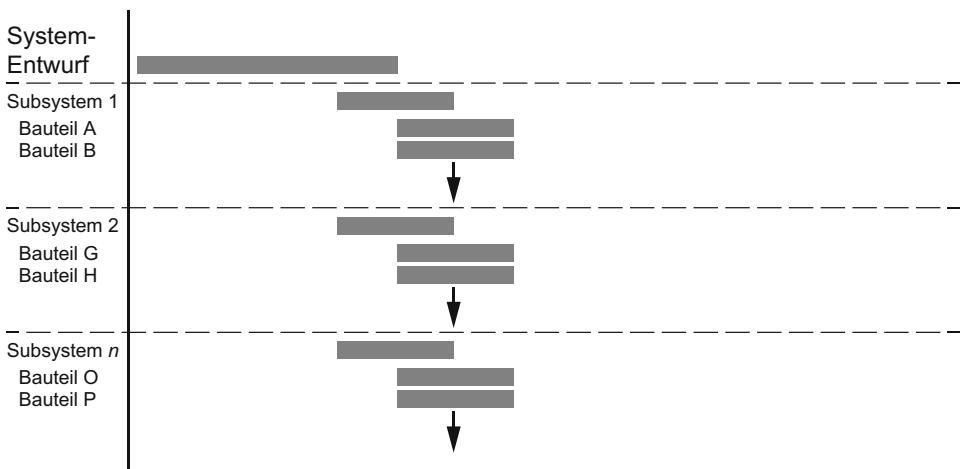
Eine Konstruktion ist nur so gut, wie es die Rahmenbedingungen zulassen.

Ehrbenspiel (2009) bezeichnet dieses Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren, bei dem die vorhandenen Rahmenbedingungen und die Bedürfnisse aller Unternehmensteile berücksichtigt werden, als „*integrierte Produktentwicklung*“.

Alle bisher wiedergegebenen Modelle des EKP stellen einen sequenziellen Ablauf der einzelnen Prozessschritte dar. In der Praxis ist dies natürlich nicht der Fall. Dies hat verschiedene Gründe:

1. Wie bereits oben erläutert, ist im Sinne eines Regelkreises eine kontinuierliche Überprüfung der Arbeitsergebnisse mit den Vorgaben erforderlich. In der Praxis werden dabei meistens nicht optimale Ergebnisse durch eine weitere Iterationsschleife im Prozess verbessert. Es wird also zurückgesprungen zu einem früheren Prozessschritt.
2. Teilprozesse, insbesondere die Beschaffung von Material betreffend, werden ebenfalls in der Praxis häufig vorgezogen. Bauteile oder Material mit langen Lieferzeiten müssen bestellt werden, bevor die Konstruktion abgeschlossen ist, um einen gegebenen Terminplan einhalten zu können.
3. Im Sinne der Abb. 1.1 ist für viele Produkte die „Time to Market“ für den Erfolg entscheidend. Deshalb wird heute versucht, möglichst alle Prozessteile des EKP parallel ablaufen zu lassen, s. Abb. 2.10.

Abbildung 2.10 gibt ein Grobmodell eines überwiegend parallel ablaufenden EKP wieder. Da der konzeptionelle Aufbau des Gesamtsystems geklärt sein muss, ist die Erarbeitung des Systementwurfs zu Beginn erforderlich. Damit liegen die Subsysteme 1 bis  $n$  fest. Deren Konzepte können dann parallel zueinander erarbeitet werden, bevor jeweils die einzelnen Komponenten und Bauteile konstruiert werden. Letzteres kann dann ebenfalls wieder parallel zueinander erfolgen. Abbildung 2.10 verdeutlicht, dass es einen vollkommenen

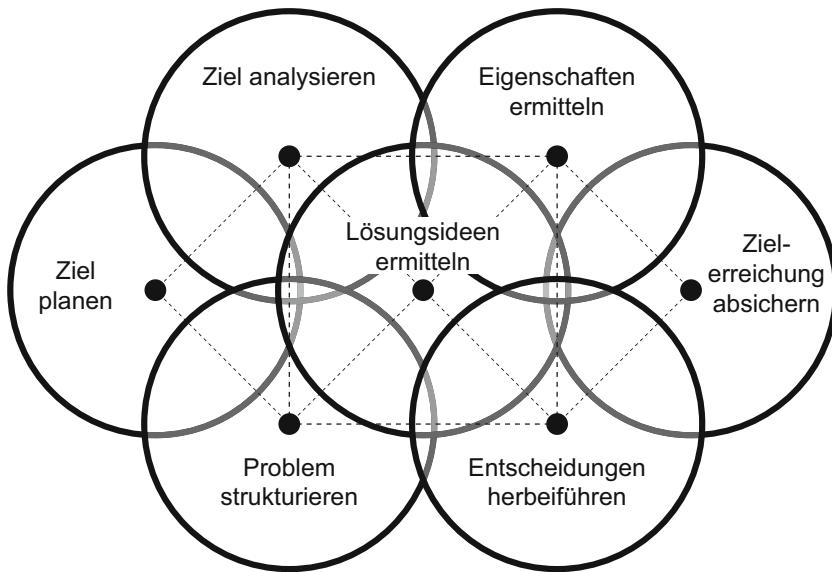


**Abb. 2.10** Modell eines EKP mit weitgehend parallel ablaufenden Arbeitsschritten

parallelen Ablauf aller Arbeitsschritte nicht geben kann, abgesehen von Wiederholkonstruktionen. Bei allen anderen Entwicklungs- und Konstruktionsarten, wie sie später behandelt werden, müssen zuerst die Gesamt- und Subsystemkonzepte erarbeitet werden. In dem Kapitel zur Rationalisierung des EKP wird auf weitere einzuhaltende Randbedingungen und Anforderungen für einen weitgehend parallelen Prozessablauf eingegangen. Es soll darauf hingewiesen werden, dass aufgrund des parallelen Ablaufs von Prozessschritten nur die Projektdauer, also wie oben erwähnt die „Time to Market“, verkürzt werden kann. Die Projektkosten bleiben mindestens gleich. Meistens erhöhen sie sich sogar aufgrund der komplexeren Projektkoordinierungsanforderungen.

Alle bisher vorgestellten Modelle des EKP bilden die Realität natürlich nur teilweise und ungenau ab und haben jeweils spezifische Schwächen. Das Modell nach Hansen z. B. berücksichtigt die Iteration nicht, s. Abb. 2.6. Das Modell nach VDI 2221 (1993), s. Abb. 2.8, geht von einem sequenziellen Vorgehen aus. Lindemann (2007) schlägt deshalb ein netzarziges Modell vor, s. Abb. 2.11. Es berücksichtigt, dass in der industriellen Praxis häufig von ersten Lösungen, meistens von Vorgängerprodukten, ausgegangen wird. Die so erarbeiteten Gesamtlösungen werden dann im Sinne des *V-Modells* nach Abb. 2.9 mit den gesetzten Zielen verglichen und, wenn notwendig, optimiert. Es wird also demnach nicht rein sequenziell oder parallel gearbeitet. Vielmehr wird zwischen den einzelnen Schritten des EKP hin und her gesprungen. Der Startpunkt des Prozesses muss dabei nicht zwangsläufig die Zielanalyse nach Abb. 2.11 sein.

Dieses Prozessmodell ist nicht auf die maximale Effizienz des Vorgehens ausgerichtet. Insbesondere wenn mit vorhandenen Lösungen gestartet wird, besteht die Gefahr unnötiger Iterationsschritte, wenn die Eigenschaften der vorhandenen Lösung nicht mit eindeutigen Zielen abgeglichen werden können, da das Ziel noch nicht oder nur teilweise festgelegt wurde. Dieses Problem taucht in der Praxis häufig auf und führt in vielen Fällen zu Fehl-



**Abb. 2.11** EKP nach Lindemann (2007)

entwicklungen. Zumindest werden aber Zeit und Geld unnötig durch dann notwendige Nacharbeiten verschwendet.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass es in Abhängigkeit von der Abstraktionshöhe kein allgemeingültiges Modell des EKP mit einem erforderlichen Detaillierungsgrad gibt. Letzterer bezieht sich auf die auszuführenden Arbeiten innerhalb eines Arbeitsschritts. Soll das Prozessmodell in der Praxis verwendbar sein, also als Vorlage dienen, um im eigenen Unternehmen den EKP zu definieren, so muss der Detaillierungsgrad schon relativ hoch sein, also genaue Anweisungen zum Handeln beinhalten. Dies kann ein allgemeines Prozessmodell nicht leisten.

Die jeweils auszuführenden Arbeitsschritte hängen nach Abeln (1990) ab von

- der *Branche*: allgemeiner Maschinenbau, Luftfahrt, Schiffsbau, Kraftwerksbau, Automobilbau, „weiße Ware“, ...
- der *Konstruktionsart*: Neu-, Varianten-, Anpass-, Wiederholkonstruktion und
- der produzierten *Stückzahl*: Groß-, Mittel-, Kleinserie und Einzelfertigung

Die bisher behandelten Modelle des EKP berücksichtigen ebenfalls nicht, dass es heute zu dem Hauptprozess des PEP eine Reihe begleitender Prozesse gibt, die parallel ablaufen. Hierzu gehören insbesondere:

- Projektmanagement,
- Risikomanagement,
- Kostenmanagement,

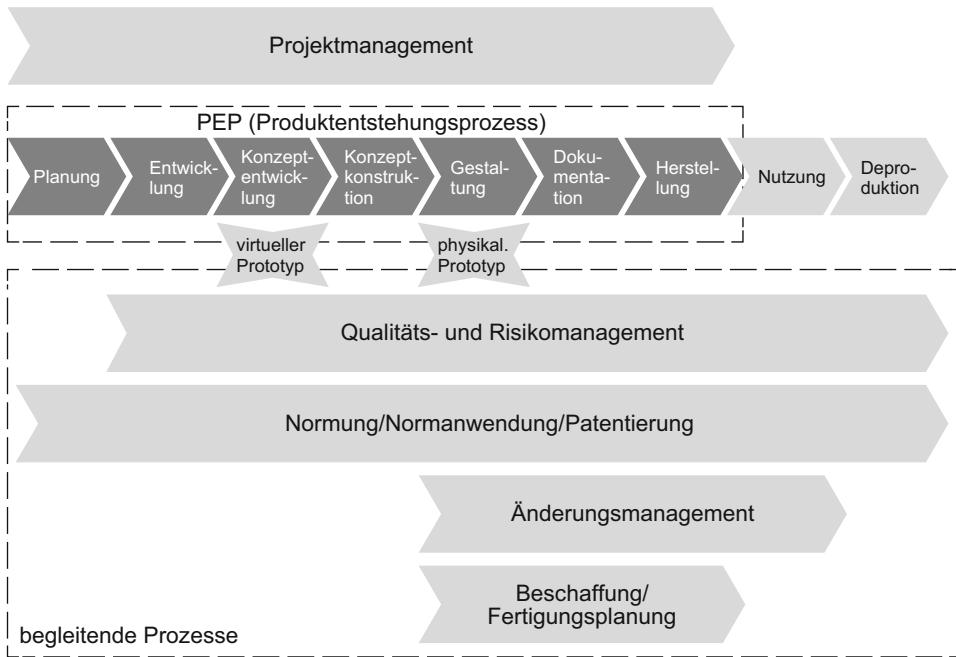
- Normung,
- Patente und Schutzrechte,
- Änderungsmanagement,
- Fertigungsplanung und Beschaffung und
- Produktdokumentation.

Die letzten beiden Punkte hat Ehrlenspiel (2009) in seinem Ansatz zur integrierten Produktentwicklung zwar berücksichtigt. Die ersten drei Punkte sind aber heute insbesondere wegen der Forderung nach einer Verkürzung der „Time to Market“ und der globalen Beschaffung auch von Ingenieursleistungen und Fertigung von großer Bedeutung.

Die Arbeit von Ingenieuren in der Entwicklung und Konstruktion wird durch diese Nebenprozesse stark beeinflusst, gleiches gilt für die Arbeitsergebnisse. Die Änderungsprozesse sind bereits bei mittelständischen Unternehmen so komplex und zeitintensiv, dass Änderungen zur Produktoptimierung häufig nicht durchgeführt werden können, da sonst der Terminplan nicht eingehalten werden kann. Die Einführung neuer Technologie für ein Unternehmen kann durch das Risikomanagement verhindert werden, wenn diese neue Technik nicht ausreichend abgesichert ist. Die Beschaffung z. B. sehr großer Gussteile von über 50 Tonnen kann über ein Jahr dauern. Würde dies zu einer Überschreitung des Terminplans führen, muss auf eine Schweißkonstruktion umgestellt werden. Häufig müssen weniger optimale Bauteile eingesetzt werden, weil nur so der geplante Kostenrahmen eingehalten werden kann. Auf Seiten der Fertigung ist es nicht unüblich, bei kleinen Serien die vorhandenen Fertigungsanlagen zu nutzen und eine Konstruktion auf diese anzupassen. In Abb. 2.12 ist ein EKP mit seinen Nebenprozessen dargestellt.

Zusammenfassend gehören zum PEP die folgenden Prozessphasen, die auch in diesem Werk behandelt werden:

1. Planung
2. Entwicklung mit den Hauptschritten: Lösungserarbeitung, Lösungsbewertung, Lösungsauswahl
3. Konzeptentwicklung mit den Hauptschritten: Festlegung der vorläufigen Produktarchitektur, Festlegung der Hauptkenngrößen der Hauptgruppen, wie Funktionsumfang, Kosten und Schnittstellen der Produktebenen Mechanik, Elektrik, Elektronik, Software.
4. Konzeptkonstruktion mit den Hauptschritten: Festlegung der Produktstruktur (mechanische Sicht auf das Produkt), Festlegung der Hauptkenngrößen der Hauptbaugruppen wie Bauraum, Gewicht, Gestalten der Hauptbaugruppen, Erstellen des Servicekonzepts (Wartung, Reparatur, Ersatzteile . . . ), Erstellen des Fertigungskonzepts
5. Gestaltung mit den Hauptschritten: Gliederung der Hauptbaugruppen in Bauteile, Gestalten der Bauteile, gestalten der Baugruppenschnittstelle
6. Dokumentation mit den Teilbereichen: Herstellungsunterlagen, Nutzungsunterlagen, Wartungsunterlagen, Reparaturunterlagen, Recyclingunterlagen, weitere Unterlagen für z. B. Arbeitssicherheit, Sicherheitsnachweise usw.



**Abb. 2.12** EKP mit begleitenden Prozessen

Wie in Abb. 2.11 dargestellt, laufen in der Praxis diese einzelnen Prozessschritte nicht unbedingt sequenziell ab.

Bereits oben wurde geschildert, dass neben dem eigentlichen Hauptprozess eine Reihe von Nebenprozessen erforderlich sind, um den PEP abzusichern und zu steuern. In Kapitel 3 wird auf das Projekt-, Änderungs- und das Risikomanagement in grundsätzlicher Form eingegangen, um die in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase notwendigen und üblichen Maßnahmen und Hilfsmittel darzustellen.

## Literatur

- Abeln O (1990) Die CA-Techniken in der industriellen Praxis. Hanser, München
- Bender B (2004) Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 377. VDI Verlag, Düsseldorf
- Ehr lenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung, 4. Aufl. Hanser, München
- EN ISO 9000 (2005) Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe
- Feldhusen J (1989) Systemkonzept für die durchgängige und flexible Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses. In: Beitz W (Hrsg) Schriftenreihe Konstruktionstechnik. TU Berlin
- Hansen F (1965) Konstruktionssystematik, 2. Aufl. Berlin (Ost)
- Heymann M (2005) „Kunst“ und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts – Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft. Chronos, Zürich

- Hubka V (1976) Theorie der Konstruktionsprozesse. Analyse der Konstruktionstätigkeit. Berlin
- Kesselring F (1954) Technische Kompositionlehre. Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewussten Schaffen. Berlin
- Koller R (1976) Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte-, und Apparatebau. Springer, Berlin
- Lindemann U (2005) Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer, Berlin
- Lindemann U (2007) Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer, Berlin
- Luczak H (1993) Arbeitswissenschaft. Springer, Berlin
- Pahl G, Beitz W (1977) Konstruktionslehre, 1. Aufl. Springer, Berlin
- Reuleaux F (1875) Lehrbuch der Kinematik, Bd 1: Theoretische Kinematik. Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens. Braunschweig
- Rodenacker G (1991) Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher, Bd 27. Springer, Berlin (1970, 2. Aufl. 1976; 3. Aufl. 1984; 4. Aufl. 1991)
- Roth K, Franke HJ, Simonek R (1971) Algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen. Feinwerktechnik 75(1971):337–345
- VDI-Richtlinie 2206 (2004) Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth, Düsseldorf
- VDI 2221 (1986) Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte. Beuth, Berlin
- VDI 2221 (1993) Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte. Beuth, Berlin
- Wögerbauer H (1943) Die Technik des Konstruierens. München

---

# Die PEP-begleitenden Prozesse

3

Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Detlef Kochan, Christiane Beyer,  
Sándor Vajna, Gamal Lashin, Florian Kauf, Heinz Gaub, Mario Schacht  
und Patrick Erk

Die Ausprägung, Intensität und Inhalte der in diesem Kapitel behandelten Prozesse sind sehr stark von der Branche, der Stückzahl und der Art der Konstruktion (Neu-, Varianten-, Anpass- und Wiederholkonstruktion) abhängig. Hier sollen deshalb nur die grundsätzlichen Aspekte erläutert werden. In jedem Unternehmen haben sich insbesondere diese PEP begleitenden Prozesse relativ individuell ausgeprägt. Allerdings ist hier seit einigen Jahren ein Gegentrend zu beobachten. Er besteht darin, diese Prozesse überall relativ einheitlich

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische  
Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

D. Kochan

Zentrum für Angewandte Forschung und Technologie e.V., Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01096 Dresden, Deutschland  
E-Mail: detlef.kochan@zaft.htw-dresden.de

C. Beyer

Associate Professor am Mechanical and Aerospace Engineering Department, California State  
University, Long Beach, 1250 Bellflower Boulevard, CA 90840-8305, Long Beach, USA  
E-Mail: cbeyer@csulb.edu

S. Vajna

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Institut für Maschinenkonstruktion,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: vajna@ovgu.de

G. Lashin

Vaillant Group, Berghauser Straße 63, 42859 Remscheid, Deutschland  
E-Mail: gamal.lashin@vaillant.de

---

zu gestalten. Auf Seiten des Änderungsprozesses liegt die Ursache in der stattgefundenen Globalisierung. Die überwiegende Zahl von Unternehmen arbeitet international mit wechselnden Partnern, z. B. Lieferanten, zusammen. In der Folge mussten die bisher individuellen Prozesse im Sinne einer Vereinheitlichung angepasst werden. Ähnlich sieht es mit dem Prozess zum Risikomanagement, insbesondere bei der Absicherung der technischen Risiken aus. Dieser Prozess ist typischerweise sehr stark vom Kunden des Unternehmens beeinflusst. Er gibt vor, welche Nachweise zur Funktions- und Eigenschaftserfüllung der Lieferant beibringen muss. Bei Großprojekten, beispielsweise die Erstellung von Verkehrssystemen wie einem People mover auf einem Flughafen oder die Erstellung eines Kraftwerks, wird diese Aufgabe häufig auf international tätige Agenturen übertragen, die sich auf diese Aufgaben spezialisiert haben. Deshalb ist auch hier eine deutliche Vereinheitlichung der Vorgehensweisen und Methoden mit den entsprechenden Hilfsmitteln zu erkennen. Im Folgenden werden die wichtigsten den PEP begleitenden Prozesse betrachtet, begonnen wird mit dem Projektmanagement. Es bildet die Planungsgrundlage und das Controlling für den PEP.

---

### 3.1 Das Projektmanagement (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

#### 3.1.1 Zeitliche und terminliche Planung

Produkte sind nur dann am Markt erfolgreich, wenn sie die folgenden drei Bedingungen erfüllen:

- Dem geforderten Kundennutzen (den Anforderungen des Kunden) nachkommen,
- rechtzeitig im Sinne von „Time to Market“ am Markt sein, und
- marktgerechte Preise ermöglichen.

In diesem Unterkapitel soll der zweite Aspekt näher betrachtet werden, da seine Bedeutung häufig von Ingenieuren unterschätzt wird und sie meistens nicht mit den Hilfsmitteln und

---

F. Kauf

Hochschule Aalen - Technik und Wirtschaft, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen, Deutschland  
E-Mail: florian.kauf@htw-aalen.de

H. Gaub

Mitglied der Geschäftsleitung (bis 2011), DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Am DIN-Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, Deutschland  
E-Mail: gaub@alum.mit.edu

M. Schacht

Geschäftsführer, Beuth Verlag, DIN Software GmbH, Am DIN-Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, Deutschland  
E-Mail: mario.schacht@din.de

P. Erk

Grünecker Kinkeldey Stockmair & Schwahnhäuser, Kurfürstendamm 38/39, 10719 Berlin, Deutschland  
E-Mail: erk@grünecker.de

Methoden einer Zeit- und Terminplanung für die Konstruktion vertraut sind. In diesem Rahmen soll nur die grundsätzliche Vorgehensweise im Sinne einer Einführung dargestellt werden.

Die Problematik der Planung entsteht im Wesentlichen aus zwei Rahmenbedingungen:

- Das Projekt/Konstruktionsergebnis muss zu einem gegebenen Zeitpunkt abgeschlossen sein, wobei zu bestimmten Zeitpunkten Zwischenergebnisse gefordert werden.
- Nicht jede Aufgabe kann von jedem Mitarbeiter bearbeitet werden. Es besteht also i. A. eine Ressourcenbeschränkung.

Das wichtigste Hilfsmittel zur Bewältigung dieser Planungsaufgabe ist der Netzplan (DIN 69 900 Teil 1 1987; DIN 69 900 Teil 2 1987). Er dient zur Ermittlung der Auftragsdurchlaufzeit und des Ressourcenbedarfs. Er stellt grafisch die logische Verknüpfung der zu erfüllenden Aufgaben eines Projekts und die ihnen zugeordneten Ressourcen dar.

Zum Aufstellen des Netzplans sind drei Hauptarbeitsschritte erforderlich:

- *Die Strukturanalyse.* Mit ihrer Hilfe werden der Zusammenhang und die Abhängigkeiten der Teilaufgaben eines Projekts untereinander ermittelt und beschrieben.
- *Die Zeitanalyse.* Im Rahmen dieser Tätigkeit wird die erforderliche Dauer jedes Teilarbeitsschritts sowie umsetzbare Starttermine für das gesamte Projekt und für die wesentlichen Hauptarbeitsschritte ermittelt.
- *Zuordnung von Mitarbeitern* zu Teilarbeitsschritten. Diese Zuordnung geschieht im ersten Schritt entsprechend der für die Ausführung des betrachteten Teilarbeitsschritts erforderlichen und durch den Mitarbeiter repräsentierten Kompetenz. Im zweiten Schritt wird die Verfügbarkeit der Mitarbeiter mit berücksichtigt. Die Verfügbarkeit von Mitarbeitern kann eingeschränkt sein durch Schulungen, Krankheit, Urlaub usw. oder weil sie für andere Aufgaben bereits verplant sind.

Die Basis zur Planung der Aufgabenstruktur bildet im Allgemeinen die Produktstruktur. Mit ihr werden die einzelnen Baugruppen und Hauptbauteile, die zu konstruieren sind, festgelegt und damit ein wesentlicher Teil der Aufgaben. In Tab. 3.1 sind der Ablauf beim Aufstellen des Netzplans und die einzelnen Arbeitsschritte im Detail beschrieben.

Abbildung 3.1 gibt den Ausschnitt eines Netzplans wieder. Die einzelnen Aufgaben werden als Balken dargestellt. Ihre Relationen ergeben sich aus der logischen oder möglichen Arbeitsabfolge, wie z. B. der Ende-Start-Bedingung. Die vorgelagerte Aufgabe muss in diesem Fall vollständig bearbeitet sein, bevor mit der folgenden begonnen werden kann, usw.

Neben den Aussagen über die Projektdauer und den Mitarbeiterbedarf und die Zuordnung der Mitarbeiter zu den Teilaufgaben des Projekts, gibt der Netzplan Aussagen über Pufferzeiten und den kritischen Pfad des Projekts. Die Pufferzeit gibt an, um wie viel Zeit sich der Start bzw. das Ende eines Vorgangs verzögern darf, ohne den Projektdurchlauf zu stören. Auf dem kritischen Pfad liegen Vorgänge, die keine Pufferzeit haben und damit die Gesamtdauer des Projekts bestimmen.

**Tab. 3.1** Erläuterungen zum Aufstellen des Netzplans

Tätigkeit	Erläuterung
1. Festlegen der Produktgliederung/-struktur	Im Allgemeinen wird von einem bereits bekannten, ähnlichen Produkt ausgegangen und dessen Struktur angepasst.
2. Festlegen der zur Erstellung der einzelnen Produktelemente notwendigen Aufgaben	Hierzu gehört jeweils eine abgestufte Betrachtung: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lösungsfindung</li> <li>- Untersuchungen</li> <li>- Entwürfe</li> <li>- Berechnungen</li> </ul>  <p>für jedes Produktelelement und für das gesamte Produkt (Systembetrachtung)</p>
3. Logisch-zeitliche Beziehung der einzelnen Aufgaben untereinander ermitteln	Abhängigkeiten von Aufgaben müssen erkannt und als eindeutige <b>WENN – DANN – BEZIEHUNG</b> dokumentiert werden: Wenn der Wellendurchmesser festgelegt ist, wird die Welle-Nabe-Verbindung des Zahnrades ausgelegt.
4. Ermitteln der Aufgabendauer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Befragung von Erfahrungsträgern</li> <li>- Äquivalenzbetrachtung vergleichbarer Aufgaben</li> <li>- Aufschreiben von abgewickelten Aufgaben</li> <li>- Schätzung</li> </ul>
5. Festlegen von Meilensteinen	<p><b>Meilensteintyp:</b></p> <p><b>Ereignisgesteuert:</b> Die Meilensteine (MS) müssen jeweils inhaltlich exakt definiert sein. Der MS ist erreicht, wenn die vorhandenen Arbeitsergebnisse die definierten MS-Inhalte erfüllen.  <b>Anwendung:</b> Meistens eingesetzt bei Abschluss einer Baugruppenkonstruktion</p> <p><b>Zeitgesteuert:</b> Der MS ist erreicht, wenn ein bestimmter Zeitpunkt erreicht oder ein bestimmtes Zeitintervall verstrichen ist.  <b>Anwendung:</b> Bei langfristigen Aufgaben, wenn während der Abwicklung keine eindeutigen Zwischenergebnisse definierbar sind.</p> <p><b>Point of no Return:</b> Zeitpunkt/Ereignis, ab dem die bis dahin erarbeiteten Ergebnisse nicht mehr geändert werden dürfen.  <b>Anwendung:</b> Absicherung von Zwischenergebnissen, z. B. gegen Kundenänderungen (Konzept).</p> <p><b>Review-Meilenstein:</b> Zeitpunkt, zu dem die Ergebnisse zu exakt definierten Inhalten explizit freigegeben/genehmigt werden müssen.  <b>Anwendung:</b> Entwurf teurer und komplexer Bauteile/-gruppen wird durch den Kunden/Fertigung freigegeben.</p>
6. Festlegen notwendiger möglicher Puffer für Aufgaben	Die Puffer dienen zur Abdeckung von Risiken, um den Projektplan bei Verzögerungen nicht zu gefährden. Puffer kommen insbesondere bei Aufgaben mit hohem Neuheitsgrad zur Anwendung.
7. Aufstellen des Netzplans  (normalerweise mit Hilfe entsprechender Tools: Microsoft Project, Super-Project-Expert, Prima Vera ...)	Der Netzplan gibt grafisch und tabellarisch alle Zusammenhänge zwischen den Aufgaben und Meilensteinen wieder. Mit seiner Hilfe wird der Projektdurchlauf bestimmt.
8. Aufstellen eines Projektkalenders	Der Projektkalender gibt die exakt für die Projektdauer verfügbaren Arbeitstage wieder.
9. Auswahl der Ressourcen und ihre Zuordnung zu Aufgaben im Netzplan	Die Auswahl geschieht nach geforderten Fähigkeiten und der Verfügbarkeit der Ressourcen zum geplanten Projektzeitpunkt.

**Tab. 3.1** (Fortsetzung)

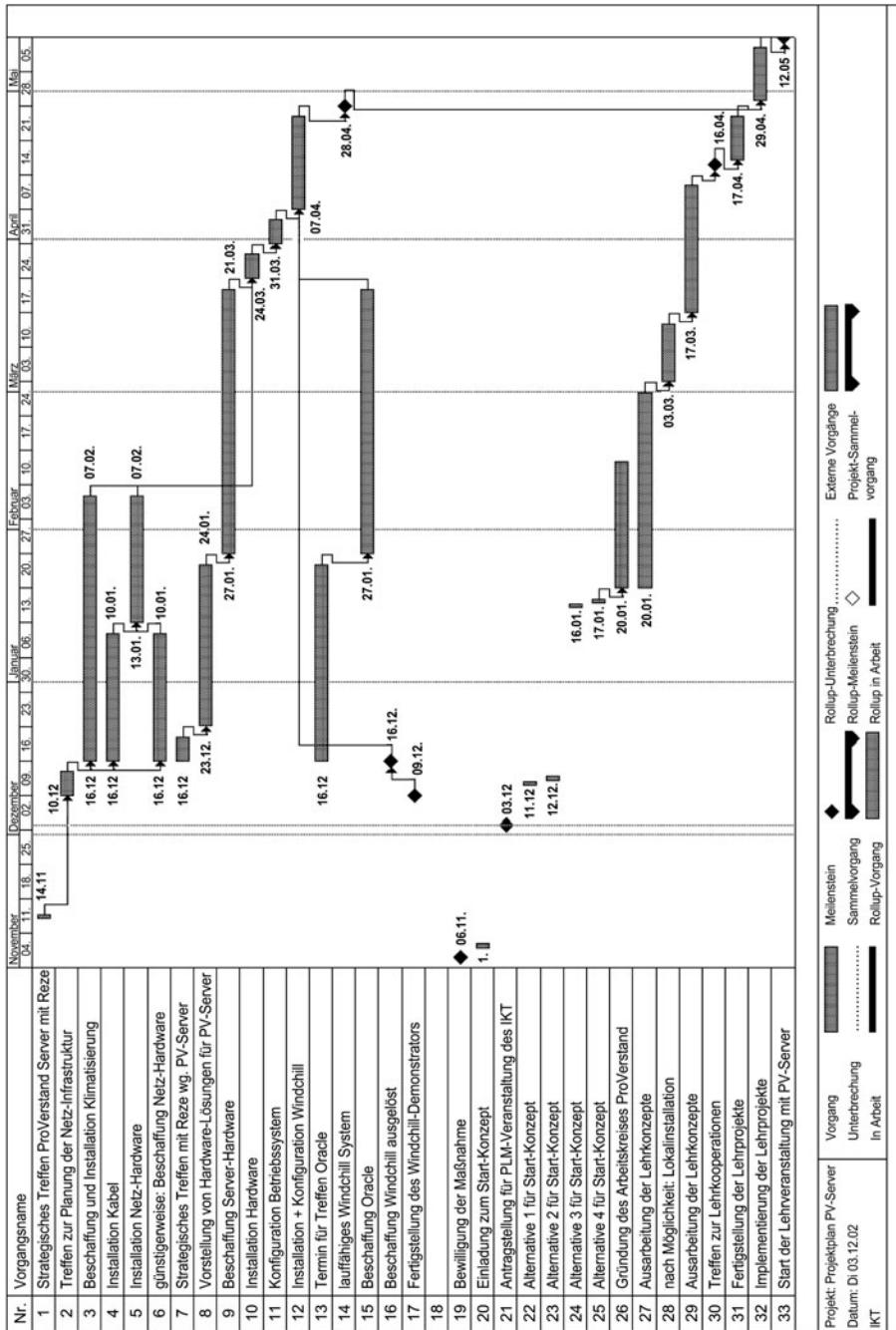
<b>Tätigkeit</b>	<b>Erläuterung</b>
10. Aufstellung des Ressourcenkalenders und Zuordnung zum Netzplan	Für jeden Mitarbeiter wird ein individueller Kalender über seine verfügbare Arbeitszeit während der Projektdauer aufgestellt. Dabei werden Urlaubstage, Schulungstage usw. berücksichtigt.
11. Erster Planungslauf	Nach der Zuordnung der Ressourcen und der individuellen Mitarbeiterkalender zum Netzplan wird ein erster Planungslauf durchgeführt.
12. Planungsbeurteilung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Werden Projekte eingehalten?</li> <li>- Welches ist der kritische Pfad? (terminbestimmende Größen ohne Puffer)</li> </ul>
13. Planungsoptimierung	Eine Planungsoptimierung/-korrektur kann erfolgen durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhung der Ressourcenkapazität</li> <li>- Terminverschiebungen</li> <li>- Reduktion des Aufgabenumfangs</li> <li>- Veränderung der Aufgabenreihenfolge</li> <li>- Veränderung der Aufgabeninhalte</li> </ul>
14. Verabschiedung des Projektplans	Der Projektplan wird durch die verantwortlichen Stellen durch Unterschrift freigegeben, im Allgemeinen auch durch den Kunden.
15. Kontinuierliches Projektcontrolling	Alle Projektgrößen wie <ul style="list-style-type: none"> <li>- Termine</li> <li>- Kosten</li> <li>- Risiken</li> </ul> werden kontinuierlich beobachtet und berichtet.

### 3.1.2 Kostenplanung des Projekts und Produkts

Die Selbstkosten eines Produkts sind die Basis zur Ermittlung des Marktpreises. Sie bestimmen somit entscheidend über den Erfolg des Produkts. Neben den Herstellkosten werden die Selbstkosten noch durch die Projektkosten zur Erstellung des Produkts beeinflusst. Hierin sind im Allgemeinen die Kosten für die Entwicklung und Konstruktion der größten Posten. Der Technikbereich eines Unternehmens hat also eine sehr hohe Kostenverantwortung.

Deshalb muss er zum einen die Herstellkosten im Auge behalten, um ein vorgegebenes Kostenziel nicht zu überschreiten. Zum anderen sind die durch das Entwickeln und Konstruieren des Produkts entstehenden Kosten zu planen und einzuhalten. In Abhängigkeit von der geplanten Stückzahl stellen diese Kosten einen hohen Anteil der Selbstkosten dar.

Der Netzplan bildet auch für die Planung der Entwicklungs- und Konstruktionskosten die Basis. Der Bereich Technik eines Unternehmens verursacht im Wesentlichen Personalkosten und in weit geringerem Maße Sachkosten durch beispielsweise die Nutzung von CAD-Anlagen, Einkauf von Entwicklungsleistung usw. Deshalb kann der Netzplan genutzt werden, um dem dort aufgeführten Mitarbeiterbedarf über die jeweils relevanten Stundensätze die verursachten Kosten zuzuordnen. Ein wichtiger Aspekt dabei ist der zeitliche Verlauf der Kosten. Er wird im Kostenplan abgebildet DIN 69 903 1987. Der Kostenplan stellt eine wichtige Unterlage zur Budgetplanung des Bereichs Technik dar.



**Abb. 3.1** Beispiel eines Netzplanes

## 3.2 Effektive Organisationsformen (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

### 3.2.1 Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Der Entwickler und Konstrukteur kann seine Arbeiten nicht losgelöst von seinem Umfeld ausführen. Vielmehr ist er auf die Ergebnisse der Arbeiten anderer angewiesen und umgekehrt. Er ist eingebunden in seine Abteilung und diese wieder in das Unternehmen. Erst die aufeinander abgestimmten Tätigkeiten aller Beteiligten führt zu befriedigenden Ergebnissen des Produktentstehungsprozesses (Ehrlenspiel 1995; Stuffer 1994). Dazu bedarf es einer Festlegung der Verantwortlichkeiten, der Arbeitsinhalte usw. für jeden Einzelnen des Unternehmens. Dies wird durch die Aufbau- und Ablauforganisation geregelt:

- Die *Aufbauorganisation* legt die Verantwortlichkeiten und Aufgaben fest und bindet sie an bestimmte Funktionsträger, Abteilungen und Institutionen. Gleichzeitig definiert sie deren Beziehungen zueinander durch die Einordnung in die Hierarchie.
- Die *Ablauforganisation* gibt die Bearbeitungsreihenfolge innerhalb des Unternehmens vor. Gegenstand ist das Arbeitsobjekt, dessen Weg mit allen notwendigen Bearbeitungsschritten vorgezeichnet wird.

Die Bemühungen, den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess möglichst effizient zu gestalten, zielen auf folgende Punkte:

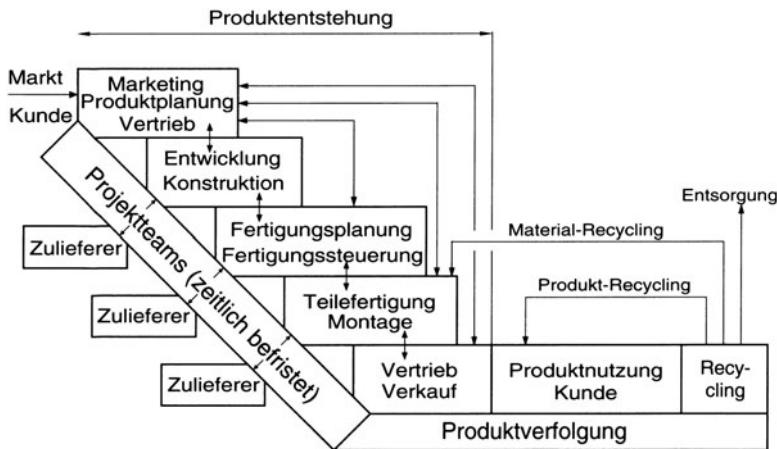
- Reduzierung der inneren Iteration, d. h. Wiederholung desselben Arbeitsschritts innerhalb eines Hauptarbeitsschritts.
- Reduzierung der äußeren Iteration, d. h. Rücksprung zu einem bereits durchgeföhrten Hauptarbeitsschritt oder sogar nochmaliges Durchlaufen der Konstruktionsphase.
- Weglassen von Arbeitsschritten.
- Parallele Bearbeitung von Arbeitsschritten.

Besonders der letzte Punkt hat das entscheidende Potenzial zur Verkürzung der Bearbeitungszeiten. Um diese vier Ziele zu erreichen, müssen im Wesentlichen drei Forderungen erfüllt werden:

- Eine entsprechende Produktgestaltung, sodass die Eigenschaften seiner Systeme, Subsysteme sowie Systemelemente für jeden Prozessschritt exakt und eindeutig modellierbar sind. Die Schnittstellen zwischen den Prozessschritten müssen exakt und eindeutig definierbar sein.
- Die Prozessschritte müssen unabhängig voneinander sein.

Mit diesen Grundvoraussetzungen und dem Arbeiten in interdisziplinären Teams sind die Voraussetzungen für ein Simultaneous oder Concurrent Engineering geschaffen.

Unter *Simultaneous* oder *Concurrent Engineering* wird eine zielgerichtete, interdisziplinäre (abteilungsgrenzüberschreitende) Zusammen- und Parallelarbeit in der gesamten Produkt-,



**Abb. 3.2** Produktentstehungs- und -verfolgungsprozess unter Simultaneous Engineering mit mindestens überlappenden Bereichsaktivitäten, Bildung eines Projektteams und engen Kontakten zu Kunden und Zulieferern (Beitz 1995)

Produktions- und Vertriebsentwicklung für den vollständigen Produktlebenslauf mit einem straffen Projektmanagement verstanden (Albers 1994). Über Erfahrungen in der Praxis berichten insbesondere Feldhusen (1994); Kramer (1993). Bei einem Produktentstehungsprozess im Simultaneous Engineering verlaufen die Aktivitäten der einzelnen Bereiche weitgehend parallel oder überlappen sich zumindest sehr deutlich mit intensiven Kontakten zum Kunden und unter Einbeziehung mannigfacher Zulieferer, s. Abb. 3.2 (Beitz 1996; Helbig 1994; Tegel 1996). Darüber hinaus erfolgt eine ständige Produktüberwachung bis zum Lebensende des Produkts.

Zur Produktentwicklung wird ein Entwicklungsteam zeitlich befristet zusammengesetzt, das nicht nur von der Konstruktion, sondern auch von allen anderen an der Produktentstehung beteiligten Bereichen beschickt wird. Es werden also so früh wie möglich neben der federführenden Konstruktion auch andere Bereiche in die Entwicklung einbezogen. Das gebildete *Team* arbeitet unter der Leitung eines *Projektmanagers* selbstständig und verantwortet seine Entscheidungen gegenüber der Geschäftsführung bzw. technischen Entwicklungsleitung selbst. Die Abteilungsgrenzen werden dadurch überwunden. Dabei kann das Team auch als ein „virtuelles Team“, also ohne äußere Organisationsform gebildet werden. Über Teamstrukturen und ihre Bedeutung in der Produktentwicklung sind in Bender et al. (1996); VDI-Richtlinie 2807 (Entwurf) (1996) kennzeichnende Hinweise zu finden.

Ziele dieser Organisation und Arbeitsweise sind:

- kürzere Entwicklungszeiten,
- schnellere Produkterstellung,
- Kostenreduktion am Produkt und in der Produktentwicklung und
- Qualitätsverbesserung.

Für die Arbeit des Konstrukteurs ergeben sich neue Aspekte (Pahl 1996):

- Arbeiten in einem interdisziplinären Team mit entsprechender Anpassung an Sprache und Begriffe,
- ein enger, unmittelbarer Informationsaustausch durch frühes Einbinden anderer Abteilungen und Disziplinen,
- unmittelbare Nutzung von Informations- und Kommunikationstechniken auf der Basis von EDV, CAD, Multimedia usw.,
- Einbindung in ein Projektmanagement mit Ablaufplan und Meilensteinen, d. h. stärker methodisch angeleitetes Arbeiten,
- Parallelisierung von Aktivitäten, die abzustimmen sind,
- Wahrnehmung bestimmter Eigenverantwortlichkeiten unter Bezug auf die Teament-scheidungen und hinsichtlich der an den einzelnen delegierten, eigenständigen Teilprobleme oder -aufgaben und
- engerer Kontakt zu den Zulieferern und Kunden.

Zweckmäßigerweise wird ein kleineres *Kernteam* gebildet, das verantwortliche Fachleute aus Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Marketing und Vertrieb umfasst. Die Zusammensetzung ist von der Problemstellung und von der Produktart abhängig. Ergänzt wird das Kernteam je nach Bedarf durch Fachleute aus der Qualitätssicherung, Montage, Steuerung und Regelung, dem Recycling und der Umweltpolitik u. Ä., die nur zeit- oder abschnittsweise im Team mitarbeiten. In einem solchen Team werden die Erkenntnis- und Wissensbestände auch benachbarter Disziplinen gemäß Abb. 3.3 mehr oder weniger von selbst aktiviert und einbezogen.

Vorteile eines interdisziplinär zusammengesetzten Teams sind:

- Wissenszuwachs und eine gegenseitige Anregung,
- gewisse Kontrolle im Team durch Hinterfragen und Aufdecken von Widersprüchen,
- deutliche Motivationsförderung durch unmittelbare Teilnahme und direkte Information und
- sofortiges Handeln aus der erkennbaren Situation, ohne dass Hierarchiestufen befragt und ihre Entscheidungen abgewartet werden müssen.

Wenn im Sinne von Lean Production (schlankerer Produktion) Informations- und Entscheidungswege kürzer werden sollen (Helbig 1994), so ist die Bildung von Projektgruppen, die auf Zeit zusammengesetzt werden und deren Mitglieder für das betreffende Projekt aus der Abteilungshierarchie ausscheiden, eine angemessene Antwort. Der bislang mehr oder weniger unter der Führung einer Abteilung oder Gruppe (in der er auch seine fachliche Heimat hatte und fachmännischen Rat einholen konnte) arbeitende Konstrukteur, wird in eine größere Selbstständigkeit und in ein ihm fremderes Umfeld geschickt. Er benötigt zur Arbeit in solchen Projektgruppen eine Reihe von Kompetenzen, die über die Fach- und Methodenkompetenz hinausgehen (Pahl 1994, 1996, Abb. 3.4). Dies ist bei der Auswahl der Projektleiter zu beachten.

**Abb. 3.3** Benachbarte Wissensbereiche, die beim Entwickeln und Konstruieren miteinander verbunden sind und einwirken



**Abb. 3.4** Notwendige Kompetenzen eines Projektleiters



### 3.2.2 Führung und Teamverhalten

Da die Entwicklung eines neuen Produkts vornehmlich in einem von der Abteilungsstruktur unabhängigen Team erfolgt, ist an ihrer Stelle eine straffe *Projektleitung* erforderlich. Der Projektleiter muss neben guten Fach- und Methodenkenntnissen auch die Merkmale eines guten Problemlösers aufweisen, um eine Gruppe von unterschiedlichen Spezialisten zu den Entwicklungszielen zu führen und die ihm gestellten Aufgaben zu bewältigen (Pahl 1996).

Der Projektleiter und das Team finden in der in diesem Buch dargelegten Konstruktionslehre eine wirksame Unterstützung, um die Vorgehensweise, die Auswahl von geeigneten Einzelmethoden, die Definition sinnvoller Entscheidungsschritte (Meilensteine) und die Verfolgung einschlägiger Konstruktionsprinzipien zu initiieren und zu prüfen. Dabei wird je nach Problemlage die geforderte Flexibilität zum Anpassen im Vorgehen und in der Methodenanwendung unter den Kriterien Wichtigkeit und Dringlichkeit immer wieder ins Spiel zu bringen sein. Der Projektleiter hat dabei einen *Führungsstil* zu praktizieren, der nicht dogmatisch wirkt, die Vielfältigkeit im Team nutzt, jedem Teammitglied Handlungsspielräume lässt und in den entscheidenden Momenten aufzeigt, wie es weitergehen soll.

Führung zeigen heißt:

1. *Rechtzeitig informieren* durch
  - frühzeitiges Aufzeigen von Abweichungen zum Projektplan,
  - Informationsmanagement auf einer einheitlichen Informationsbasis.
2. Die *Einzelaktivitäten* nach methodischem Vorgehen behutsam *steuern* durch
  - Planung der wichtigsten Projektgrößen wie Termine, Kosten, Ressourcen,
  - Verfolgung der wichtigsten Projektgrößen,
  - Abschätzen des Aufwands und seine Folgen bei Änderungen,
  - evtl. Korrektur des Projektplans.
3. Das Team nach außen *wirkungsvoll* vertreten durch
  - Managen des Berichtswesens,
  - einsichtige persönliche Referate u. a.
4. *Überzeugende Entscheidungen* in schwierigen Situationen anregen oder treffen, wodurch auch die Teambildung und das Vertrauen innerhalb des Teams gezielt gefördert werden kann.

Vermag er diesen Anforderungen nicht gerecht zu werden, wird das Organisationsmodell „Simultaneous Engineering“ keinen Erfolg haben.

Aber auch das *Teamverhalten* spielt eine wesentliche Rolle. Neben den in Abschn. 3.2.1 bereits erwähnten Vorteilen, von denen die Produktentwicklung und das Teammitglied profitieren, können nämlich auch Probleme mit folgenden Tendenzen auftreten (Badke-Schaub 1993):

- Gruppen oder längerfristig zusammenarbeitende Teams neigen zu unzulässiger Vereinfachung,
- mangelnde Effektivitätskontrolle der Teamarbeit,

- im Team wird Konformität erzeugt, die mit einer Kompetenzschutztendenz und Selbstüberschätzung einhergeht,
- Gruppen, die lange erfolgreich zusammengearbeitet haben, entwickeln ein Selbstbewusstsein, das u. U. nicht gerechtfertigt ist,
- innerhalb eines Teams sind häufig selbsternannte Meinungswächter zu finden, die andere dominieren; hier muss das Projektmanagement dämpfend eingreifen,
- soziales Faulenzen, also Inaktivität auf Kosten anderer.

Neben einer verständigen Teamleitung hilft gegen die genannten Probleme die Bildung von nur kleinen Teams, eine offene Aussprache, ggf. ein Personenaustausch oder entsprechende Ergänzung sowie grundsätzlich eine Auflösung des Teams nach Erreichen des Entwicklungsziels.

Über die Effektivität von Gruppen bzw. Teamarbeit gegenüber Einzelarbeit haben sich Dörner und Badke-Schaub (Dörner 1994; Badke-Schaub 1993) geäußert. Eine generelle Aussage ist schwierig. Es scheint so zu sein, dass Gruppenmeinungen eher auf einem höheren Niveau nivelliert sind, d. h. in ihrem Ergebnis nie so gut wie die beste Einzelperson, aber auch nie schlechter als die schlechteste Einzelperson sind. Eine Einzelidee oder Einzelarbeit kann sich hervorragend (genial) von einem Gruppenergebnis abheben, wie auch Einzelne merklich unter dem Niveau einer Gruppe liegen können.

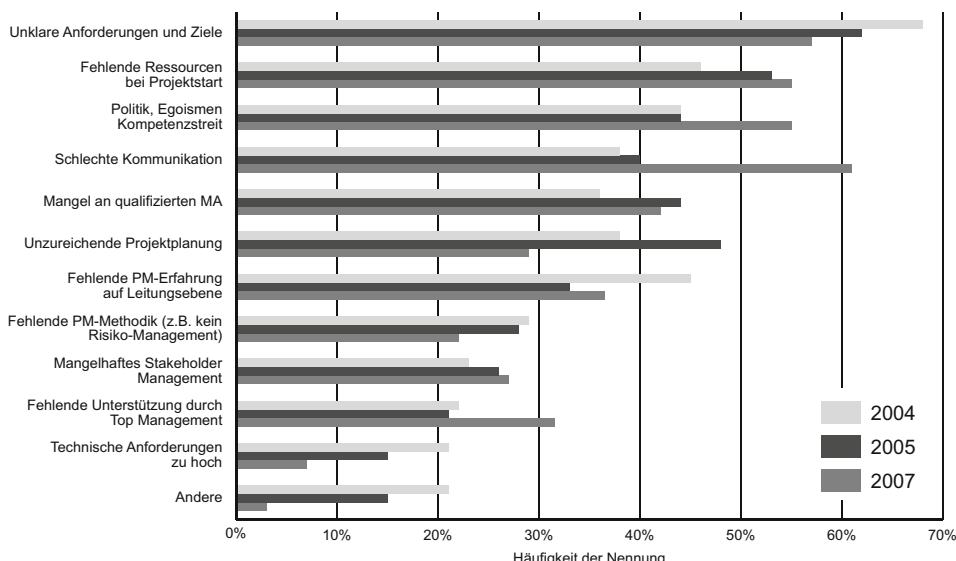
Hieraus folgt, dass überraschende Vorschläge von Einzelpersonen nicht unterdrückt werden dürfen, sondern ihr Anliegen soweit zu entwickeln ist, bis eine eindeutige Beurteilung im Vergleich zum Teamergebnis möglich ist. Hochwertige individuelle und originelle Leistung ist in einer Gruppe oder in einem Team nicht immer zu erbringen bzw. zu erwarten, d. h., es müssen auch Chancen für hochwertige Einzelleistungen gewahrt bleiben. Teambildung ist nicht immer ein Allheilmittel für gute Lösungen. Betriebsklima und Führungsstil bestimmen nach wie vor sowohl den effektiven Teameinsatz als auch die erfolgreiche Einzelarbeit.

---

### 3.3 Risikomanagement (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Es ist leicht nachvollziehbar, dass immer, wenn neue Lösungen eingesetzt werden oder neue Aufgabenstellungen gelöst werden sollen, ein Risiko des Scheiterns gegeben ist. Dabei können vom Produkt grundsätzlich die erwarteten Leistungsdaten, Funktionen oder die Wirtschaftlichkeit beim Betrieb bzw. beim Vertrieb des Produkts, die Gewinnerwartung, verfehlt werden. Die Ursachen für das Scheitern eines Produkts sind, wie Studien zeigen, dabei vielfältiger, als auf den ersten Blick angenommen. Abbildung 3.5 verdeutlicht anschaulich die Wichtigkeit einer geklärten Aufgabenstellung sowie der Aktivitäten zu Projektbeginn. Im Rahmen dieses Werks soll auf den Einfluss des technischen Bereichs auf die Verringerung der Risiken eingegangen und einsetzbare Methoden und Hilfsmittel vorgestellt werden.

Nach Harrant und Hemmrich (2004) kann der Begriff „Risiko“ als ein noch nicht eingetretenes Ereignis, welches einen möglichen positiven oder einen negativen Einfluss auf die jeweiligen Ziele hat, definiert werden.



**Abb. 3.5** Ursachen für das Scheitern von Projekten (Engel und Quadejacob 2008)

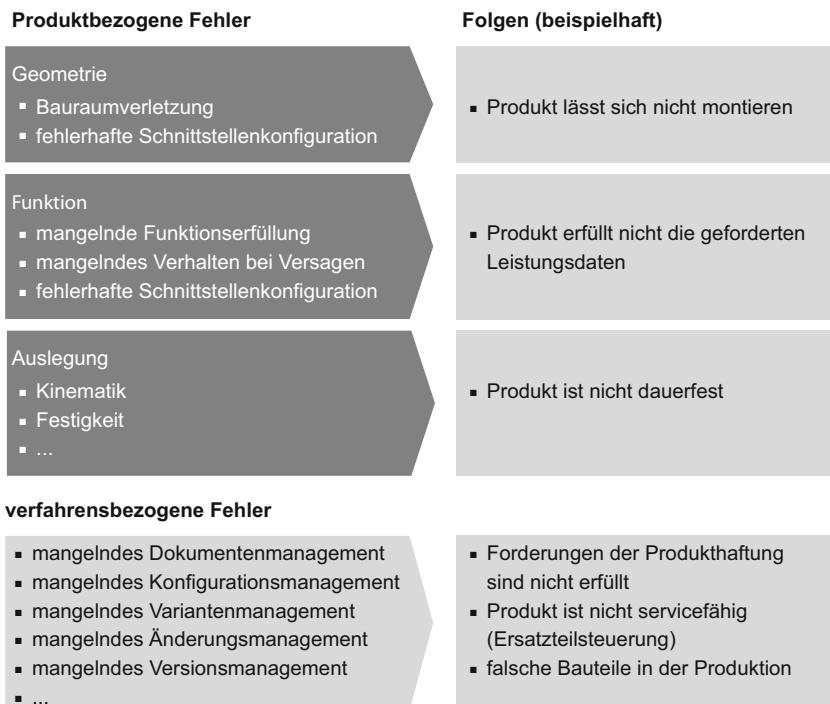
Risiko ist also grundsätzlich ein Ereignis mit negativem Einfluss, Chancen dagegen sind Ereignisse mit positivem Einfluss. Risiken entstehen bei der technischen Abwicklung eines Projekts durch:

- *mangelhafte/fehlerhafte Daten*: Die auftretenden Belastungen wurden falsch angesetzt; es liegen keine exakten Werksstoffkennwerte vor, z. B. für GFK-Bauteile,
- *mangelhafte/fehlerhafte Modelle*: Zur Festigkeitsanalyse werden falsche oder mangelhafte Ansätze verwendet; die Kopplung bei der Mehrkörpersimulation wird falsch angesetzt,
- *mangelhafte/fehlerhafte Methoden*: Messverfahren bei Experimenten, falsche Elemente bei der Anwendung von Finite Elemente Methoden.

Neben diesen Fehlerursachen, die in der Praxis typischer Weise zu Problemen mit dem Produkt und damit auch mit dem Kunden führen, gibt es auch Risiken aufgrund von Verfahrensmängeln, welche insbesondere hinsichtlich der Aspekte der Produkthaftung von Bedeutung sind, s. Abb. 3.6.

Bei der Risikovermeidung im technischen Bereich eines Unternehmens geht es also zuerst um das Erkennen der in der Abb. 3.6 aufgeführten Mängel- und Fehlerpotenziale. Dazu werden in Harrant und Hemmrich (2004) einige grundsätzliche Verfahren vorgeschlagen:

- Brainstorming: Auf Basis des Projektplans werden in einer Art Szenarienschau mögliche Risiken identifiziert,
- Studium ähnlicher Projekte: Dies ist besonders effektiv. Voraussetzung ist aber, dass von durchgeföhrten Projekten entsprechende Unterlagen existieren wie z. B. „Lessons learned“, usw.,



**Abb. 3.6** Mögliche Fehler in der Entwicklung und Konstruktion

- Besichtigungsanalysen: Auch hier kommt es auf eine Vergleichbarkeit mit dem zu erstellenden Produkt an. Meistens ist es möglich, während der Besichtigung entsprechende Szenarien für z. B. den Transport des Produkts, dessen Installation, Inbetriebnahme usw. zu entwickeln und mögliche Risiken zu entdecken. Es soll an dieser Stelle ganz deutlich darauf hingewiesen werden, dass entsprechende rechnergestützte Simulationen meistens nicht hinreichend sind, um alle Risiken zu entdecken und richtig bewerten zu können,
- Organisationsanalyse: Hierbei wird das firmeninterne und -externe Umfeld dahingehend analysiert, ob alle Voraussetzungen zur Risikominimierung, insbesondere hinsichtlich der Abwicklung und Verantwortlichkeiten, geregelt sind,
- Checklisten: Diese sind ein in der Praxis sehr bewährtes Hilfsmittel. Sie setzen aber die Anwendbarkeit voraus. Es ist also zweckmäßig, zu Beginn einer jeden Checkliste die Voraussetzung für ihre Anwendbarkeit darzulegen. „Welche Art von Projekten“, „welche Größe von Projekten“, usw.

Im Folgenden soll auf die Methoden zur Vermeidung produktbezogener Fehler eingegangen werden. Auf die Vermeidung von geometrie- und auslegungsbezogener Fehler wird in dem Abschnitt zur Rechnerunterstützung in der Entwicklung und Konstruktion eingegangen (Teil 2, Kap. 3.2). Hier werden entsprechend Fehler betrachtet, die im Wesentlichen die Funktionserfüllung beeinflussen. Einen Überblick über Maßnahmen zur Vermeidung produktbezogener Fehler gibt Abb. 3.7 wieder.



**Abb. 3.7** Beispiele für Maßnahmen zur Vermeidung produktbezogener Fehler

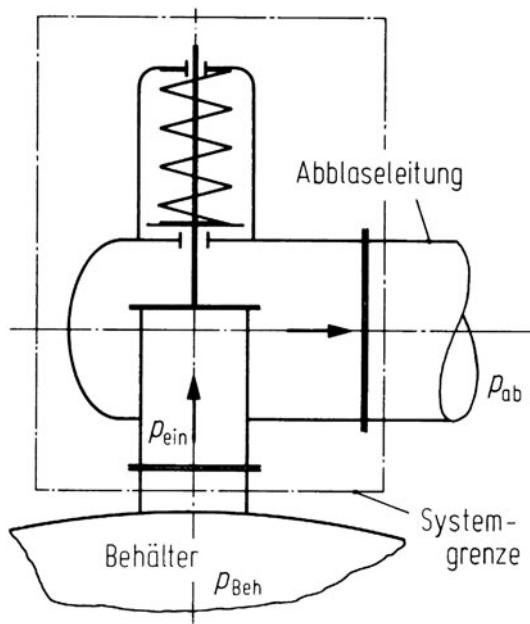
### 3.3.1 Methoden zum Erkennen von Funktionsmängeln

Die virtuelle Produktentwicklung ist heute eine Voraussetzung zur effizienten und kosten-günstigen Produktentwicklung. Allerdings sind klassische Methoden trotz aller Fortschritte bei der Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess nach wie vor unverzichtbar. Dies gilt insbesondere für Methoden zur Fehlererkennung im Rahmen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses und hier insbesondere für die Absicherung der funktionalen Aspekte eines Produkts. Im Folgenden sollen deshalb bewährte und in der Praxis verbreitete Methoden zur Fehlererkennung im oben geschilderten Sinn dargestellt werden.

**Fehlerbaumanalyse** Die Fehlerbaumanalyse wird in der Literatur häufig auch als FTA (engl. Fault Tree Analysis) bezeichnet.

Fehlverhalten und Störgrößeneinfluss können zur Sicherheits- und Zuverlässigkeitssanalyse für Anlagen und Systeme, d. h. technische Produkte, im Rahmen des methodischen Konstruierens gezielt und konsequent mit der *Fehlerbaumanalyse* (in der Sicherheitstechnik auch *Gefährdungsbaumanalyse* genannt) ermittelt werden (DIN 25 424 Teil 1). Die Fehlerbaumanalyse beruht auf der booleschen Algebra und dient der quantitativen Abschätzung von Fehlern, Fehlerfolgen und Fehlerursachen bei sicherheitsrelevanten Systemen. Sie ist eine Kausalitätsmethode, d. h. jedes Ereignis muss mindestens eine Ursache aufweisen. Erst wenn diese Ursache eintritt, tritt auch das Ereignis, der Störfall, ein.

**Abb. 3.8** Schema eines Sicherheits-Abblasevents für Gasbehälter



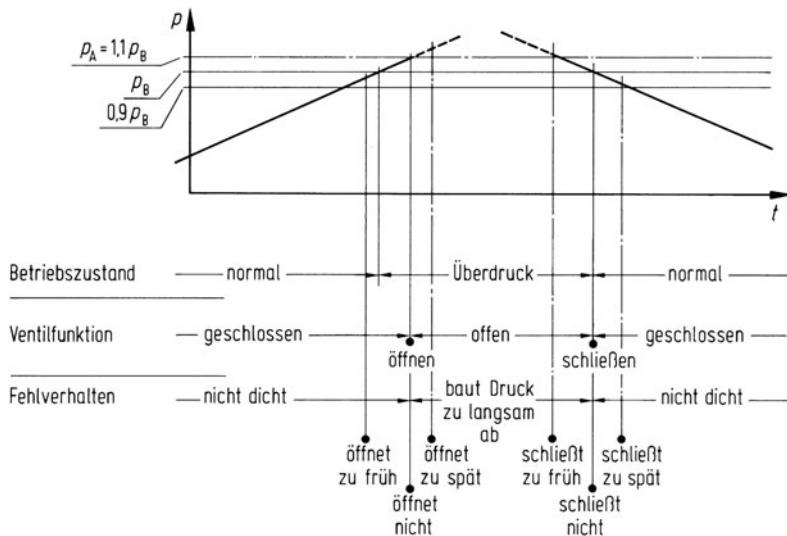
Aus der Konzeptphase ist die Funktionsstruktur mit den einzelnen Telfunktionen, die zu erfüllen sind, bekannt. Durch die Entwurfsbearbeitung sind die erforderlichen Nebenfunktionen ebenfalls erkannt worden. Die Funktionsstruktur kann somit ergänzt werden. Für eine Baugruppe oder eine zu prüfende Zone können alle notwendigen Funktionen dargestellt werden.

Die erkannten Funktionen werden nun nacheinander negiert, d. h. es wird unterstellt, dass sie nicht erfüllt würden. Unter Nutzung der Gestaltungsleitlinien sind dann mögliche Ursachen eines solchen Fehlverhaltens oder Störgrößeneinflusses zu suchen, ihre ODER- bzw. UND-Verknüpfung zu erkennen und nach Auswirkungen zu analysieren.

Die daraus zu ziehenden Konsequenzen führen zu einer entsprechenden Verbesserung des Entwurfs, im Notfall zur Überprüfung des Konzepts, oder zu Vorschriften hinsichtlich Fertigung, Montage, Transport, Gebrauch und Instandhaltung.

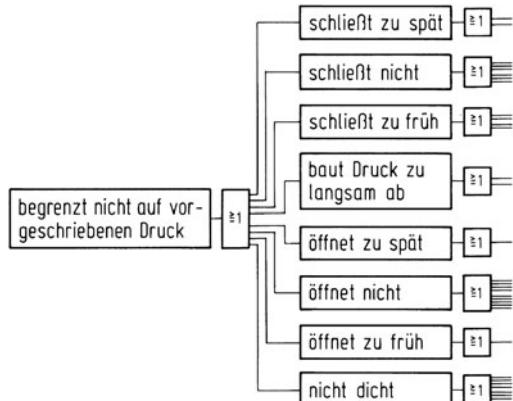
Ein Beispiel möge dieses Vorgehen erläutern:

Ein Sicherheits-Abblaseventil für Gasbehälter (s. Abb. 3.8) soll bereits in der *Konzeptphase* auf mögliches Fehlverhalten untersucht werden. Ausgehend von der Anforderungsliste und den erkennbaren Funktionen lässt sich der Zusammenhang in Abb. 3.9 ableiten. Bei Überschreiten des 1,1-fachen Betriebsdrucks (Abblasedruck) soll das Sicherheitsventil öffnen, bei Unterschreiten des Betriebsdrucks wieder schließen. Die Hauptfunktionen zu diesen Zuständen sind: „Ventil öffnen bzw. schließen“. Die Gesamtfunktion kann auch mit „auf vorgeschriebenen Druck begrenzen“ beschrieben werden. Unter Einbeziehung des zeitlichen Ablaufs wird nun ein mögliches Fehlverhalten der Gesamtfunktion durch: „Ventil begrenzt nicht auf vorgeschriebenen Druck“ angenommen, s. Abb. 3.10. Ebenso werden die aus Abb. 3.9 erkennbaren Telfunktionen mit den zeitlichen Zuordnungen negiert. Sie stehen zur Gesamtfunktion in einer ODER-Verknüpfung.



**Abb. 3.9** Betriebszustand, Ventil-Hauptfunktionen und Fehlverhalten des Sicherheitsventils

**Abb. 3.10** Aufbau eines Fehlerbaums ausgehend von dem nach Abb. 3.8 erkannten Fehlverhalten

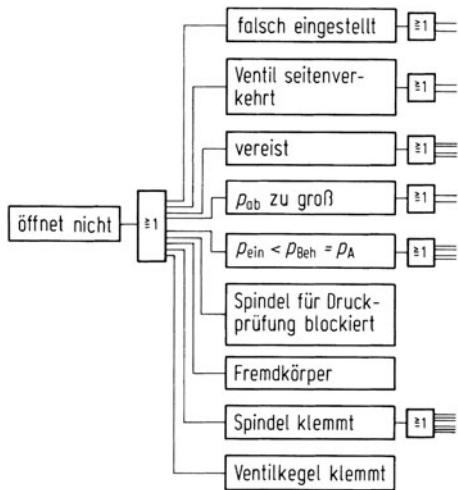


Das mögliche Fehlverhalten wird nun in einem weiteren Schritt durch Fragen nach den Ursachen untersucht (s. Abb. 3.11), wobei als Beispiel nur das Fehlverhalten „öffnet nicht“ dargestellt wurde.

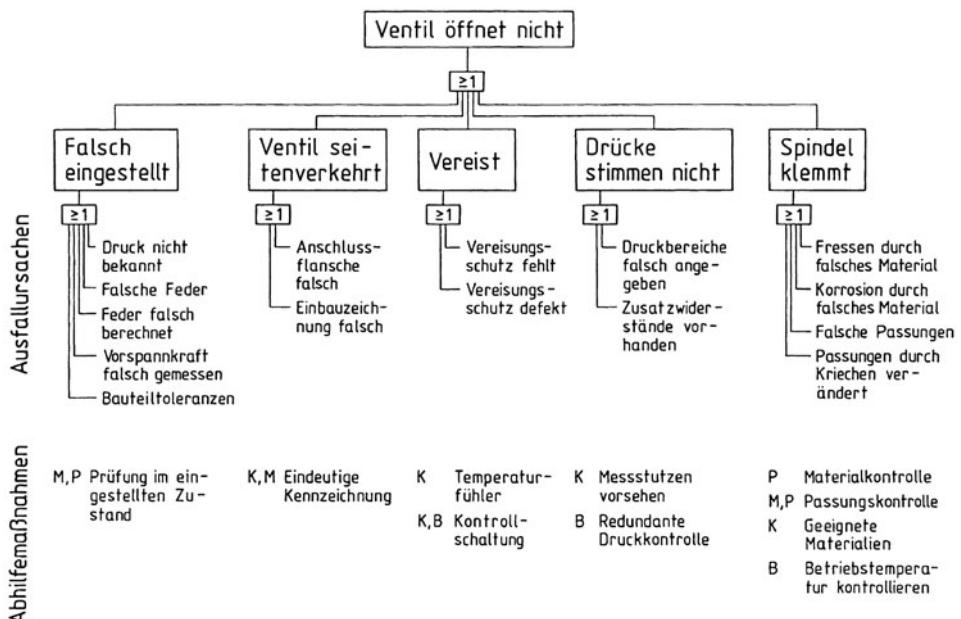
Es können für einen erkannten Fehler weitere Gründe vorhanden sein, die ggf. in einer ODER- bzw. UND-Verknüpfung weiterverfolgt werden.

Abbildung 3.12 gibt hierfür eine Auswahl weiterer Ausfallursachen und auch schon erkennbare Abhilfemaßnahmen, obwohl diese oft erst in der Entwurfsphase konkretisiert werden können. Die Kennzeichnung der Abhilfemaßnahmen nach betroffenen Abteilungen erleichtert deren Durchführung. Aufgrund der aus der Fehlerbaumanalyse gewonnenen Erkenntnisse der gesamten Untersuchung ergibt sich oft auch eine Verbesserung bzw. Vervollständigung der Anforderungsliste (s. Abb. 3.13), bevor an die Entwurfsarbeit herangegangen wird. So können wichtige Erkenntnisse zur zweckmäßigen Gestaltung gewonnen und Fehler vermieden werden.

**Abb. 3.11** Ausschnitt des nach Abb. 3.9 vervollständigten Fehlerbaums für das Teil-Fehlverhalten „öffnet nicht“



**Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA)** Eine FMEA ist eine weitgehend formalisierte analytische Methode zur systematischen Erfassung möglicher Fehler und zur Abschätzung der damit verbundenen Risiken (Auswirkungen) (Franke 1987; Masing 1994; VDA 1986). Hauptziel ist die Risikoverminderung bzw. -vermeidung. Die FMEA beruht auf einer unmittelbaren Betrachtung eines Fehlers und dessen Folgen sowie Ursachen. Sie



**Abb. 3.12** Ausfallursachen und Abhilfemaßnahmen für Fehlverhalten nach Abb. 3.11

1. Ausgabe 1.9.73

			Anforderungsliste für Sicherheits - Abblaseventil	Blatt: 1 Seite: 3
Änder.	F W	Pos.	Anforderungen x)	Verantw.
1.9.73		22	Ventilteller mit ebener Dichtfläche ( kein Ventilkegel )	
"		23	Keine starre Verbindung Ventilteller - Spindel	
"		24	Einfache Möglichkeit Dichtflächen auszubessern oder auszutauschen	
"		25	Hubbegrenzung in definierter Lage	
"		26	Dämpfung der Ventilbewegung	
"	W	27	Aufstellung in verschlossenem, frostgeschütztem Raum ( siehe auch DIN 3396 5.22 )	
"		28	Keine schleifenden Dichtungen, Reibung vermeiden	
"		29	Eindeutige Einbaustellung erzwingen ( z. B. unterschiedliche Flanschgrößen für Ein- und Austritt )	
x) Forderungen wurden nach Erstellung des Fehlerbaumes und der Gegenmaßnahmen ergänzt.				
Ersetzt      Ausgabe vom				

**Abb. 3.13** Ergänzung der Anforderungsliste nach Durchführung der Fehlerbaumanalyse

lässt also nur eine unmittelbare Verknüpfung zwischen Fehlerursachen und Fehlerfolgen zu. Eingesetzt wird diese Methode im Wesentlichen bei Neuentwicklungen. Man unterscheidet zwischen der Konstruktions- bzw. Entwicklungs-FMEA und der Prozess- bzw. Fertigungs-FMEA. Bei der Konstruktions-/Entwicklungs-FMEA steht die Frage im Vordergrund, ob die in der Anforderungsliste geforderten Funktionen erfüllt werden. Mit Hilfe der Prozess-FMEA wird geprüft, ob der geplante Herstellprozess geeignet ist, die geforderten Produkteigenschaften zu erreichen.

Abbildung 3.14 zeigt den Aufbau eines FMEA-Formblatts mit einem Beispiel, in dem potentielle Fehler mit ihren Folgen und Ursachen, ihrer Risiko-Prioritätszahl (RPZ), den

<b>Fehler-Möglichkeiten und Einfluß-Analyse</b> <b>Konstruktions-FMEA</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Prozeß-FMEA</b> <input type="checkbox"/>				<b>Kurvenzylinder</b> Teil-Benennung Erstellt durch (Name/Abt./Telefon) Hr. Wende			
<b>Fehler-Ort/Merkmal</b> <b>TU-Berlin</b> Institut für Maschinendesign - Konstruktionstechnik	<b>Fehler-Art</b> <b>Auswirkung</b> <b>Fehler-Ursache</b>	<b>Derzeitiger Zustand</b>			<b>Verbesserter Zustand</b>		
		<b>Kontroll-Maßnahmen</b>		<b>RPZ</b>	<b>Empfohlene Maßnahmen</b>		<b>Gehoffte Maßnahmen</b>
Welle	Bruch der Welle	Totalausfall	Belastungsart nicht korrekt erkannt	3 10 10	300	Auftretende Belastung durch geeigneten Bereichsansatz erfassen	festigkeitsnachweis der Welle
Lagerung	Spiegel in der Lageranordnung	unexakte Funktionserfüllung	Lückern der Wellenmutter im Betrieb <b>Stellverspruchung</b>	3 8 10	240	Wellenmutter	1 10 10
	Dichtung durchlässig	frühzeitiger Legeverschleiß	Dichtung genügt nicht den Anforderungen	2 5 10	100	Radialwellendichtring nach DIN verwenden	1 8 10
Welle-Nabe-Verbindung (Flanschschraubverbindung)	Reibschluß nicht ausreichend	Querbeanspruchung der Schrauben	Aussteigungsfehler (Nichtberücksichtigung der Reibwerte)	2 6 10	120	Aureichenden Sicherheitsbeiwert berücksichtigen	1 6 10
	Passungsgenauigkeit	Fügen nicht möglich bzw. Zentrierung nicht ausreichend	Konstruktionsfehler	2 5 1	10	Toleranzrechnung überprüfen	1 5 1
	Bruch der Schrauben	Totalausfall	Belastungsart nicht korrekt erkannt	3 10 10	300	Geigneten Berechnungssatz für den vorliegenden Belastungsfall verwenden	1 10 10
Kurvenzylinder	Flächenpressung zu groß	Pittings (Grübchen) in der Lauffläche	zu hohe Flächenpressung durch den Hebel	7 8 10	560	Geignete Werkstoffpaarung Angepasste Geometrie	2 8 10

**A: Auftreten**

Wahrscheinlichkeit des Auftretens (Fehler kann vorkommen)	Auswirkungen auf den Kunden	Auswirkungen auf den Kunden
unwahrscheinlich = 1 sehr gering = 2 - 3 gering = 4 - 6 mäßig = 7 - 8 hoch = 9 - 10	kaum wahrnehmbare Auswirkungen unbedeutender Fehler (geringe Belästigung des Kunden)	hoch = 1 mäßig = 2 - 3 mäßig schwächer Fehler = 4 - 6 schwerer Fehler (Veränderung des Kunden) = 7 - 8 äußerst schwerwiegender Fehler = 9 - 10

**B: Bedeutung**

Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (vor Auslieferung an Kunden)	E: Entdeckung
hoch = 1000 mittel = 125 keine = 1	RPZ: Rieko-Prioritätszahl

**Abb. 3.14** FMEA-Formblatt. Das eingetragene Beispiel betrifft Welle, Lagerung und Kurvenzylinder

vorgesehenen Prüfmaßnahmen (Ist-Zustand) und den empfohlenen und letztlich getroffenen Abhilfemaßnahmen zusammengestellt werden. Es gibt gleichzeitig den Ablauf einer FMEA wieder:

1. Risikoanalyse mit der Betrachtung von Bauteilen/Prozessschritten in Bezug auf:
  - potentielle Fehler,
  - Fehlerfolgen,
  - Fehlerursachen,
  - geplante Maßnahmen zur Vermeidung der Fehler,
  - geplante Maßnahmen zur Entdeckung der Fehler.
2. Risikobewertung:
  - Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Fehlerauftretts,
  - Abschätzung der vom Kunden wahrgenommenen Auswirkungen beim Auftreten des Fehlers,
  - Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler vor Auslieferung entdeckt wird (hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit bedeutet kleines Risiko und gleichzeitig kleine Punktezahl).
3. Bestimmung der Risikoprioritätszahl: Ab RPZ > 125 ist der Zustand kritisch.
4. Risikominimierung: Entwickeln von Maßnahmen zur Verbesserung der Konstruktion/des Prozesses.

Von besonderer Bedeutung ist eine Risikobewertung mit Hilfe von Risiko-Prioritätszahlen, die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Fehlers, der Folgen und der Entdeckbarkeit abschätzen. Der letztgenannte Punkt erfordert also ein erfahrenes Team zur Risikobeurteilung, damit der Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit entdeckt wird. Die FMEA hat einen mehr qualitativen Charakter und ist eine Methode der Qualitätsbewertung. Mit der Durchführung befassen sich, ähnlich wie bei der Wertanalyse, Arbeitsgruppen aus den Bereichen Entwicklung/Konstruktion, Fertigungsplanung, Qualitätswesen, Einkauf und Vertrieb/Kundendienst. Neben der Bewertung des möglichen Ausfallverhaltens durch Fehler und Störgrößen fördert die FMEA eine Zusammenarbeit der an der Produktentstehung beteiligten Bereiche zu einem frühen Zeitpunkt. Im Gegensatz zur Fehlerbaumanalyse, die dem Konstrukteur unmittelbar dienen soll, ist eine FMEA auch eine Art Übergabeprotokoll für die Fertigung und dient der Steuerung des gesamten Qualitätssicherungsprozesses.

Schließlich bietet die FMEA nach einem Zeitraum der Anwendung über die Dokumentation und Auswertung der Formblätter einen ständigen Erkenntniszuwachs hinsichtlich qualitätssichernder Maßnahmen.

Speziell für den Fertigungsablauf wird häufig mit dem gleichen Formblatt noch eine Prozess-FMEA durchgeführt. Diese Bewertung der Fertigungsschritte ist aber oft bereits indirekt in der Konstruktion-(Produkt-)FMEA enthalten, da bei dieser bereits die später vorgesehenen Fertigungsprozessschritte berücksichtigt werden müssen.

Eine sehr umfassende und übersichtliche Darstellung zur FMEA findet sich in Bertsche et al. (2009) und Bertsche (2008).

**Abb. 3.15** Schritte im Rahmen eines Design Reviews

<b>Einladung</b>
zur Teilnahme am Design Review
<b>Vorbereitung</b>
Erstellen von Beurteilungskriterien und Checklisten zur Durcharbeitung/Prüfung des Review-Objekts
<b>Sitzung</b>
zur gemeinsamen Prüfung des Review-Objekts
<b>Nacharbeiten</b>
zur Behebung der gefundenen Fehler und Abweichungen
<b>Überprüfung</b>
der Überarbeitung und Freigabe des Objekts

**Abb. 3.16** Zeitsteuerung von Design Reviews. (**Hinweis:** Alle Reviewtermine müssen im Terminplan als Meilenstein aufgeführt werden)

<b>Ereignisgesteuerte Reviews</b>
Die Durchführung eines Design Reviews ist abhängig vom Eintreten eines genau definierten Ereignisses z. B.: Fertigstellung von Unterlagen, Lieferung einer Baugruppe ...
Diese Reviewabhängigkeiten werden bei Schlüsselkomponenten und wichtigen Unterlagen gewählt.
<b>Zeitgesteuerte Reviews</b>
Die Durchführung eines Design Reviews geschieht an vorher festgelegten Zeitpunkten und in vorher festgelegten Abständen. Diese Reviewabhängigkeiten werden für Reviewobjekte gewählt, deren Bearbeitung einen längeren Zeitraum erfordert. Durch das Reviewen von Zwischenergebnissen werden Änderungskosten und Fehlentwicklungen vermieden.

**Design Reviews** Im Rahmen von Design Reviews wird die Kompetenz verschiedener Unternehmensbereiche genutzt, um herauszufinden, ob ein Produkt die definierten Ziele erreicht. Die Zwischenergebnisse des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses werden also gemeinschaftlich von Mitgliedern der unterschiedlichen Unternehmensbereiche aus ihren jeweiligen Blickwinkeln und nach ihren jeweiligen Anforderungen beurteilt. Die Ergebnisse dieser Beurteilung werden auf einem Formblatt festgehalten. Ein Design Review ist also das systematische und dokumentierte Durcharbeiten von Zeichnungen, Berechnungen, Pflichtenheften und sonstigen technischen Beschreibungen wie Wartungs- und Montageanleitungen zu einem genau definierten Zeitpunkt mit dem Ziel, sich einen Überblick über inhaltliche Abweichungen gegenüber Vorgaben zu verschaffen. In Abb. 3.15 sind die Hauptschritte im Rahmen eines Design Reviews wiedergegeben.

Wie in Abb. 3.16 wiedergegeben, gibt es zwei grundsätzliche Arten, den Zeitpunkt von Design Reviews festzulegen. Sie müssen unbedingt im Terminplan des Projekts verankert sein.



Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH  
Bereich VT7 T7

### Checkliste 04.07.05 Halterahmen

Kunde:

Projekt - Nr.:

Nr.	Prüfkriterien	nicht erfüllt	erfüllt	Bemerkungen
	Allgemein			
	Ist ein Baugruppenverantwortlicher benannt?			
	Ist die Montage mit der AV abgesprochen?			
	Wenn ja, wo dokumentiert?			
	Sind Vormontagebaugruppen gebildet worden?			
	Auf welcher Basis erfolgt die Auswahl des Konstruktionsprinzips			
	Sind Bauteile aus dieser Baugruppe in die projektspezifische Ersatzteilliste aufgenommen worden?			
	Ist das Arbeitspaket freigegeben?			
	Sind Prüfschlüssel und ESN Nummern angegeben worden?			
	Ist die Bemaßung der Zeichnung in Bezug auf Überprüfbarkeit am Fahrzeug sinnfällig?			
	Welche Vorgaben an den Brandschutz sind einzuhalten?			
	Ist die Normprüfung erfolgt und dokumentiert?			

**Abb. 3.17** Ausschnitt aus einer Checkliste für ein Design Review

Die Reviews selbst werden am zweckmäßigsten anhand von Checklisten durchgeführt, s. Abb. 3.17.

Das Ergebnis eines Design Reviews muss dokumentiert werden. Auch hier ist zur Arbeitserleichterung ein Standardformblatt sinnvoll. Es dokumentiert mindestens

- die gemeinsam beschlossenen Änderungen,
- die Umsetzungsverantwortlichen,
- den Zeitpunkt der Erledigung,
- den Zeitpunkt der erneuten Prüfung.

**Das virtuelle Produkt** Die virtuelle Produktentwicklung, d. h. die rechnerinterne Abbildung der Produkteigenschaften, stellt heute eine notwendige und effiziente Methode zur Absicherung der Entwicklung und Konstruktion von Produkten dar. In vielen Fällen ist sie sogar unverzichtbar. Dies gilt beispielsweise für den Anlagenbau. Die sehr kleinen Stückzahlen in diesem Segment des Maschinenbaus lassen einen Prototyp zur Absicherung aus Kostengründen nicht zu. Alle Untersuchungen müssen also in Form von Simulationen mit Hilfe entsprechender Programmsysteme im Rechner durchgeführt werden. Diese als CAE (engl. Computer Aided Engineering) bezeichnete Methode beinhaltet alle heute zum Teil weitverbreiteten Berechnungsprogramme wie die Finite Elemente Methode (FEM) oder die Mehrkörpersimulation (MKS). Auf diese Methoden wird in Teil 2 eingegangen.

**Versuche** Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, sind auch heute noch trotz hervorragender rechnergestützter Simulationssoftware Labor- und Feldversuche erforderlich. Der Großteil der Simulationssoftware benötigt solche Ergebnisse, um die mit ihr erzeugten Aussagen verifizieren zu können, bzw. die Ergebnisse zu kalibrieren. Dies gilt insbesondere für Berechnungssoftware, wie z. B. solche nach der FEM. Ohne entsprechende Versuche sind die reinen Simulationsergebnisse nicht oder nur sehr beschränkt aussagefähig.

Darüber hinaus sind in einigen Branchen Versuche zur Absicherung der Entwicklungs- und Konstruktionsergebnisse vorgeschrieben. Dies ist im Einzelfall zu klären. Insbesondere die weltweite Vermarktung vieler Produkte macht diesen Punkt für Unternehmen heute schwierig und risikoreich.

---

### 3.4 Innovationspotenzial der Generativen Fertigung (Christiane Beyer, Detlef Kochan)

Mit der Verfügbarkeit geschlossener 3D-CAD-Datenmodelle komplexer geometrischer Objekte wurden die Voraussetzungen für völlig neue *Rapid Technologien* in der Fertigungstechnik geschaffen. Sie lösten eine außerordentlich dynamische Entwicklung aus, die zu einem breiten Spektrum neuartiger Technologien mit vielseitigen Anwendungsbereichen führte. Den Auftakt bildete die Messe Autofact in den USA im Jahre 1988, auf der die Stereolithografie (räumliches Drucken), eine völlig neuartige Anlagentechnik zum Generieren räumlicher Objekte, vorgestellt wurde. Die ersten Anwendungen wurde als *Rapid Prototyping* bekannt. Deshalb werden bis heute alle verwandten Verfahren mit dem Attribut *rapid* in Verbindung gebracht und mit *Rapid . . . -ing* bezeichnet, z. B. Rapid Tooling, Rapid Manufacturing.

Die inzwischen verfügbaren technischen Möglichkeiten auf dem gesamten Gebiet der *Rapid Technologien*, die die schnelle und günstige Herstellung geometrischer Objekte beliebiger Kompliziertheit direkt aus 3D-Daten bezeichnen, haben tiefgreifenden Einfluss auf alle technischen Wertschöpfungsketten ausgeübt, wie z. B. Produkt-Design, Entwick-

lung, Konstruktion und Produktions- und Qualitätsmanagement. Für das gesamte neue Gebiet der *Rapid Technologien* wurde vom VDI in der Richtlinie 3404 (N.N. 2007) der Oberbegriff *Generative Verfahren* vorgeschlagen. Aus dem Englischen bzw. Amerikanischen stammend, hat sich mittlerweile ebenso im deutschsprachigen Raum der Begriff *Additive Manufacturing* durchgesetzt.

Obwohl das Additive Manufacturing mit ca. 20 Jahren eine relativ junge Fachdisziplin darstellt, sind die gravierenden Effekte, die mit den verschiedenen Technologien im Sinne einer effizienten Produkt- und Fertigungsprozessoptimierung erzielt werden können, von herausragender Bedeutung. Diese Verfahren bieten innovative und vielseitige Möglichkeiten zur beschleunigten Produktgestaltung sowie zur erweiterten Optimierung des Designs und der Fertigungsprozesse. Darüber hinaus ist durch die Einbindung dieser Technologien eine Herstellung von Bauteilen mit extremer Komplexität sowie mit inneren (Hohlraum-) Strukturen realisierbar, wie sie bislang mit herkömmlichen Methoden und Verfahren nur sehr schwer oder unmöglich war. Energieeinsparungen durch reduziertes Gewicht von Bauteilen bei gleicher Stabilität und Belastbarkeit ist beispielsweise nur eines der entscheidenden Qualitätsmerkmale innovativer Produktanforderungen.

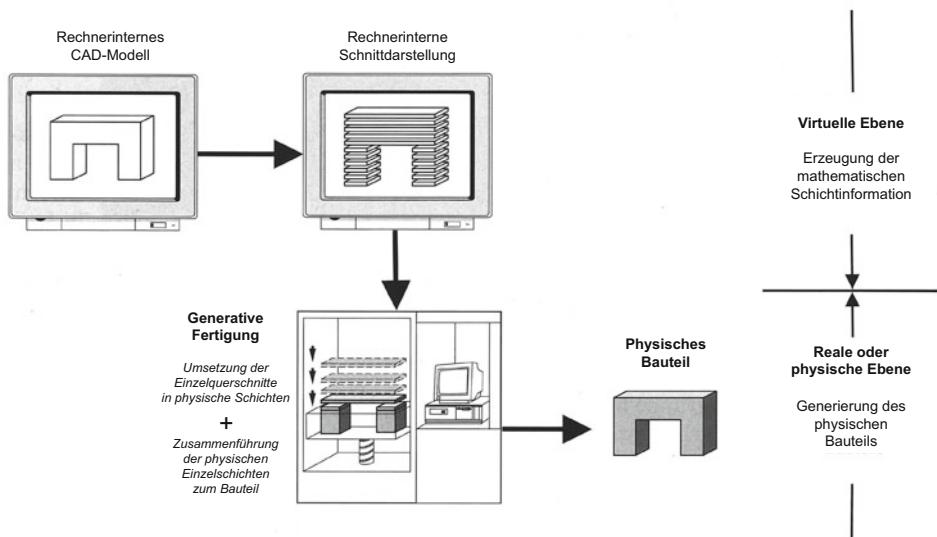
Zudem sind durch die Einbindung der Additiven Fertigungsverfahren, insbesondere in der Kleinserienproduktionen, steigende Variantenvielfalt und individualisierte Produkte möglich und wirtschaftlich geworden, da die bei konventionellen Fertigungsverfahren auftretenden Nachteile, wie z. B. großer Zeitaufwand für den Werkzeugaufbau sowie sehr schwer oder unmöglich herstellbare Geometrien usw., durch diese neuartigen Verfahren überwunden werden konnten. Damit sind werkzeuglose Produktion, losgrößenangepasste oder individuelle Fertigung günstig durchführbar, mit denen die hohen industriellen Marktanforderungen erfüllt werden können.

Der Aspekt „Innovationspotenziale der Additive Manufacturing Technologien in den industriellen Anwendungsbereichen“ ist somit für alle Beteiligten am technischen Wertschöpfungsprozess von großem Interesse. Um das Verständnis für die Einbindung der Technologien in den Produktentwicklungsprozess sowie für die effiziente Gestaltung möglicher, zum Teil völlig neuartiger Prozessketten schaffen zu können, werden zu Beginn des Kapitels die Grundlagen zur Daten- und Schnittstellenproblematik, verschiedenen physikalischen Prinzipien zu den derzeit auf dem Markt befindlichen Technologien sowie die Verarbeitung möglicher Werkstoffe erläutert.

### 3.4.1 Grundprinzip der Generativen Fertigungsverfahren

Die Bauteile entstehen durch das schichtweise Hinzufügen von Material. Das allgemeine Grundprinzip ist in Abb. 3.18 veranschaulicht und kann folgendermaßen beschrieben werden:

- Grundlegende Voraussetzung für diese Fertigungsverfahren ist ein vollständig geschlossenes 3D-CAD-Volumenmodell, welches üblicherweise in den standardisierten



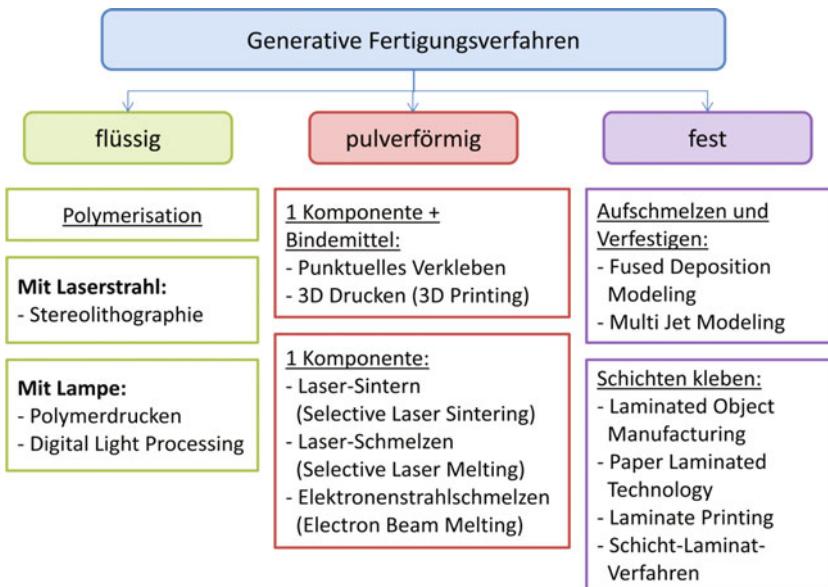
**Abb. 3.18** Allgemeines Prinzip der Generativen Fertigung (Gebhardt 2007)

Formaten *STL* (*Surface Tessellation Language*) oder *VRML* (*Virtual Reality Modeling Language*) für Folgeprozesse bereitgestellt wird (s. Abb. 3.18).

- Das 3D-CAD-Modell wird mittels einer Software in gleich dicke, ebene Schichten geschnitten (Slice-Prozess) und an die Fertigungsanlage übergeben.
- In einem automatisierten Bauprozess werden die gewünschten Objekte mit spezifischen Materialien (flüssig, pulverförmig oder fest als Draht oder Folie) schichtweise aufgebaut.
- Je nach Verfahren schließt sich ein mehr oder weniger aufwändiger Folgeprozess zur Reinigung/Fertigstellung der Bauteile oder Aufbereitung für Folgeprozesse an.

Abbildung 3.19 stellt wesentliche Prinzipien der generativen Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von unterschiedlichen Materialien und verschiedenartig genutzten Effekten dar. Die schon in den Anfangsjahren vorgeschlagene, grundsätzliche Entwicklung der Verfahren (Kochan 1993) hat sich auch für die Einordnung der aktuellen Entwicklungen mit pulverförmigen metallischen Ausgangsmaterialien bewährt.

Die Zuordnung der Generativen bzw. Additiven Fertigungsverfahren zu den Verfahrenshauptgruppen entsprechend Klassifizierung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (2003) in Urformen, Umformen, Fügen usw. lässt sich nicht unmittelbar vornehmen bzw. ist nur teilweise gerechtfertigt, da die Herstellung in der Regel eine Verfahrenskombination darstellt. Aus diesem Grunde haben sich für die Generativen Verfahren neue Begriffe und Bezeichnungen entwickelt. Auf die wichtigsten Begriffe wird im folgenden Kapitel eingegangen.



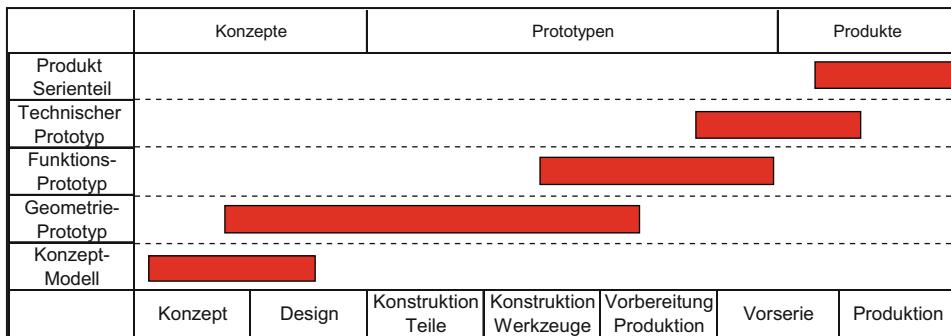
**Abb. 3.19** Mögliche Klassifikation der Grundprinzipien Generativer Fertigungsverfahren nach Ausgangswerkstoff und Physikalischen Prinzipien (Kochan 1993)

### 3.4.2 Begriffe

Unter dem Aspekt einer gewissen Eigenständigkeit der Verfahrenskategorie der Generativen bzw. Additiven Fertigung hat sich sowohl im deutschsprachigen Raum als auch international eine Reihe von Begriffen herausgebildet. An dieser Stelle wird jedoch nur auf die wesentlichen eingegangen.

Die Bestrebungen für die Entwicklung und Einbindung der hier beschriebenen Fertigungsverfahren waren anfänglich im Wesentlichen auf die schnelle Herstellung von Konzept- bzw. Geometriemodellen (s. Abb. 3.20) ausgerichtet. Deshalb hat sich der noch heute häufig verwendete Begriff des *Rapid Prototyping* (*RP*) herauskristallisiert. Parallel dazu wurden im englischsprachigen Raum die Begriffe *Layer Manufacturing* oder *Solid Freeform Manufacturing* (*SFM*) verwendet, die heute jedoch fast vollständig aus dem Sprachgebrauch verschwunden sind.

Mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Verfahren und Systeme bezogen auf Prozessstabilität, Materialvielfalt, Bauteiltoleranz etc. wurde die Anwendung ausgeweitet auf die Herstellung von Funktionsprototypen und/oder Serienteile geringer Losgrößen (dem sog. *Rapid Manufacturing* (*RM*)) bzw. Anwendungen im Werkzeug- und Formenbau (dem *Rapid Tooling* (*RT*))). Jacob hat ebenso bereits 1993 die Verwendung der Begriffe *Rapid Prototyping and Manufacturing* für den amerikanischen Raum vorgeschlagen (vgl. Jacob 1992). Für die Zusammenfassung der verschiedenen Verfahren und Systeme hat sich auch der Begriff *Rapid Technologien* durchgesetzt.



**Abb. 3.20** Einsatz von generativ gefertigten Bauteilen in der Produktentwicklung (vgl. N.N. 2007)

Um jedoch vergleichbar zum Fertigungsverfahren des High Speed Cutting (HSC) dem Anspruch der Beschreibung des Fertigungsverfahrens treffender als lediglich *Rapid* gerecht zu werden, wurde der Begriff *Generative Fertigung* als erster Standard zu diesen Technologien in der VDI Richtlinie vorgeschlagen (vgl. N.N. 2007). Vergleichbar wurde im Amerikanischen der Begriff *Additive Manufacturing* (AM) eingeführt (vgl. Wohlers 2011).

### 3.4.3 Datenaustausch

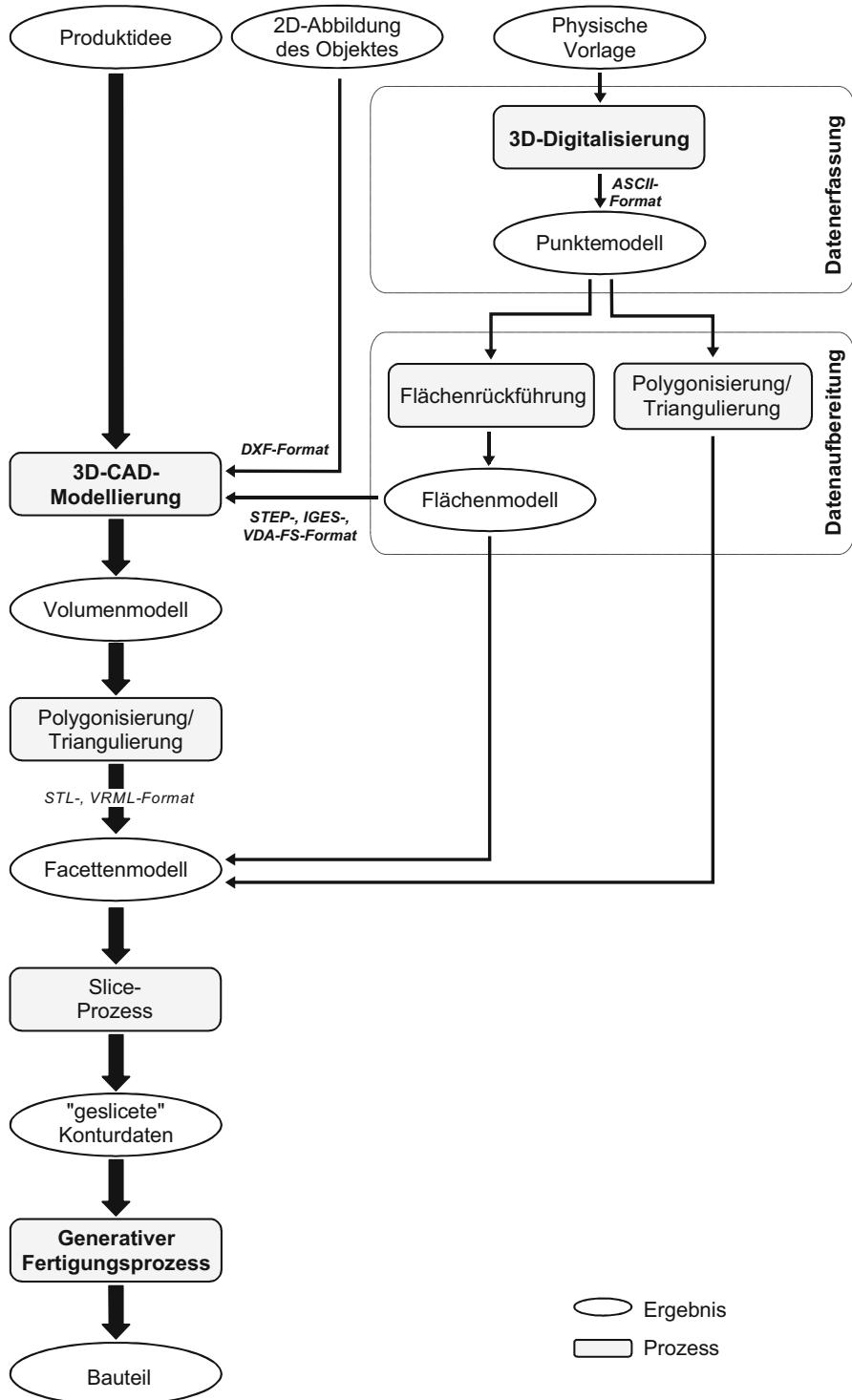
#### 3.4.3.1 Datenerstellung und -aufbereitung

Die grundlegende Voraussetzung zur Herstellung von physischen Objekten mittels Generativer oder Additiver Fertigungsverfahren ist die Verfügbarkeit von digitalen und vollständig geschlossenen dreidimensionalen Datenmodellen (vgl. Abschn. 3.4.1), auch als *Volumenmodell* oder *Solid Model* bezeichnet. Zur Erzeugung derartiger digitaler Volumenmodelle stehen grundsätzlich zwei Wege zur Verfügung:

- Direkte Modellierung in einem *3D-CAD-System* (*Computer Aided Design*) und
- *3D-Digitalisierung* mit anschließender Datenaufbereitung.

Die Nutzung der *3D-CAD-Modellierung* und Einbindung in den Konstruktionsprozess gehört heutzutage zum Stand der Technik (*Forward Engineering*). Hierfür steht eine Vielzahl von unterschiedlichen CAD-Systemen zur Verfügung. Auf die Rechnerunterstützung und Einbindung von CAD-Systemen in den Konstruktionsprozess wird in Teil 2 – Kap. 3.2 eingegangen. Bei der CAD-Modellierung werden die Produktideen oder 2D-Skizzen bzw. Zeichnungen mit Hilfe des CAD-Programms in digitale Volumenmodelle umgewandelt (s. Abb. 3.21).

Soll dagegen aus einem bereits existierenden Objekt eine digitale (ggf. auch veränderte) Kopie erzeugt werden, wird in der Regel die *3D-Digitalisierung* angewendet (vgl. Schöne



**Abb. 3.21** Datenfluss von der Produktidee bis zum realen Bauteil (vgl. N.N. 2007)

2009; Beyer 2002). In den Anfängen der 3D-Digitalisierung wurden Koordinatenmessmaschinen eingesetzt, die die Objektoberfläche taktil vermessen haben. Seit der enormen Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Kamera- und Computertechnik – erforderlich aufgrund der anfallenden Datenmengen – sind mittlerweile fast ausschließlich optische Systeme im Einsatz, die die Objektoberfläche durch Reflexion von Laserlicht, weißem oder blauem Licht erfassen. Zunehmend finden ebenso die in der Medizin eingesetzten Computertomographen (CT) oder Elektronenstrahlgeräte ihre Anwendung im industriellen Bereich, da damit zusätzlich die Erfassung von inneren Strukturen (z. B. von Hohlräumen) ermöglicht wird.

Unabhängig vom Datenerfassungsverfahren, müssen die durch x, y, z -Werte beschriebenen Punktkoordinaten, die sog. *Punktwolke*, anschließend in *Flächenmodelle* (durch *Flächenrückführung*) und/oder in *Facettenmodelle* (durch *Polygonisierung/Triangulierung*) umgewandelt werden. Hierfür stehen spezielle Softwareprogramme mit entsprechenden Werkzeugen zur Verfügung.

Den Einstieg in die industrielle Nutzung fand die 3D-Digitalisierung besonders über Modelle mit organischen bzw. Freiformflächen, die schwierig per Hand zu vermessen und im CAD-System zu modellieren und nachzubilden sind. Aufgrund der bereits möglichen Genauigkeit beim Erfassen der Objekte sowie durch die in den Programmen bereitgestellten, zunehmend leistungsfähigeren Werkzeuge weitet sich die Anwendung der Digitalisierung mittlerweile ebenso auf Objekte mit Regelgeometrien aus. Besonders zukunftsweisend sind entsprechende Softwarewerkzeuge und Prozeduren, die die Aufbereitung von parametrischen CAD-Modellen unterstützen, was die Nutzung und Weiterverwendung der Daten erheblich erweitert.

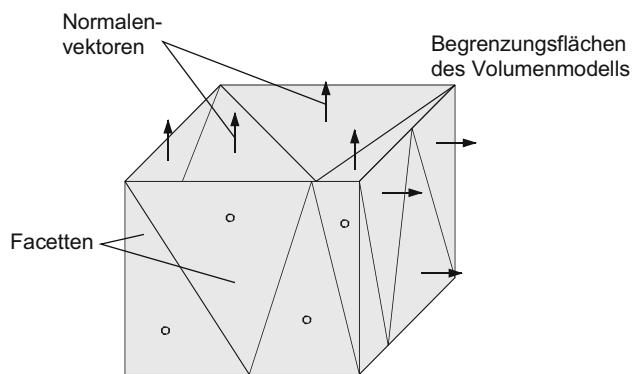
Nach der Erstellung der digitalen Objektdaten (entweder durch Forward Engineering oder Reverse Engineering) werden diese in der Regel als standardisiertes Facettenmodell im STL- oder VRML-Format zur Fertigung übergeben (vgl. Abschn. 3.4.3.2). Die Daten werden zunächst verfahrensgerecht aufbereitet. Dieser Prozess umfasst den für alle Rapid Technologien gleichermaßen notwendigen Slice-Prozess, d. h. dem Zerschneiden des Facettenmodells in Schichten entsprechend verfahrensdefinierter Schichtdicke und dem gleichzeitigen Ermitteln der Schichtinformationen bzw. Konturlinien pro Schicht. Dieser Vorgang wird bei einigen Anlagen direkt in der Anlagesoftware durchgeführt, andere Anlagen erfordern die Aufbereitung der Slice-Daten durch separate Software.

Nach Ermittlung der Schicht- bzw. Konturdaten wird normalerweise der Bauprozess gestartet und bis zur Fertigstellung des Objektes Material schichtweise zugefügt. In Abb. 3.21 ist der komplette Datenfluss von der Erstellung der Daten bis zum realen Bauteil nach Fertigung dargestellt.

### 3.4.3.2 Datenformat Facettenmodell

**STL-Datenformat** Für den Datentransfer bei der Nutzung Generativer Fertigungsverfahren hat sich das STL-Format (sowohl interpretiert mit Surface Tesselation Language als auch Standard Triangulation Language oder Standard Transformation Language; \*.stl) als Quasi-Industriestandardformat durchgesetzt. Dieses Datenformat wurde im Zusam-

**Abb. 3.22** Darstellung der Facetten im STL-Format  
(vgl. Beyer 2002)



menhang mit der Entwicklung des ersten RP-Verfahrens, der Stereolithografie, erstmalig für Generative Fertigungsverfahren industriell genutzt, was ebenso die gebräuchliche Interpretation als **Stereo Lithography Format** erklärt.

Das STL-Format ist ein systemneutrales Datenformat, welches lediglich zur Speicherung von Geometrieeininformationen genutzt wird. Die Beschreibung der Begrenzungsflächen eines Volumens wird durch planare Dreiecksfacetten (englisch tesselation = Parkettierung) und ihrem Normalenvektor vorgenommen. Dieser ist erforderlich, um die Innen- und Außenseite des Objektes unterscheiden zu können. Die Abspeicherung ist im ASCII-Code möglich, sie wird jedoch aufgrund einer geringeren Dateigröße im Binär-Code bevorzugt.

Mit dem STL-Format können beliebige (ebene oder auch stark gekrümmte) Oberflächen eines 3D-Modells beschrieben werden. Je stärker eine Fläche gekrümmmt ist, desto mehr Polygone sind zur genauen Beschreibung der Kontur erforderlich. Die Einstellparameter (z. B. Sehnenhöhe u. a.) bei der Ausgabe des Datenfiles steuern die Größe und Anzahl der Dreiecksfacetten und somit die Genauigkeit der Approximation (vgl. Stéphane und Peter 2008).

Das elementare Grundprinzip des STL-Datenformates wird in Abb. 3.22 am Beispiel eines Würfels vereinfacht dargestellt.

Obgleich überwiegend das STL-Format im Zusammenhang mit der Generativen Fertigung zur Anwendung kommt, gibt es einige Systeme, die in Ergänzung zum STL-Format das VRML-Format (*Virtual Reality Modeling Language*; \*.vrml) verwenden. Dieses Format weist die gleiche Struktur (triangulierte Oberflächen) auf, speichert jedoch die Daten in anderer Form als STL, was sich begünstigend auf den Speicherbedarf auswirkt und dem Format damit auch eine bevorzugte Verwendung bei Computerspielen, in der „Virtual Reality“ und bei 3D-Anwendungen im Internet verschafft. Zudem bietet VRML die Möglichkeit, die Oberflächen mit Farben oder Texturen zu versehen. Allerdings wird VRML nicht von allen Systemen korrekt erzeugt oder gelesen, was die Durchsetzung dieses Formates bisher verhindert hat.

Verfahren	Werkstoff				
	Papier	Kunststoff	Formsand	Metall	Keramik
Stereolithographie (vgl. Abschn. 3.4.5.1)					
Digital Light Processing (vgl. Abschn. 3.4.5.1)					
Laser Sintern (vgl. Abschn. 3.4.5.2)					
Masken Sintern (vgl. Abschn. 3.4.5.2)					
Strahlschmelzen (vgl. Abschn. 3.4.5.3)					
Fused Layer Modeling / Manufacturing (vgl. Abschn. 3.4.5.4)					
Multi-Jet Modeling (vgl. Abschn. 3.4.5.4)					
3D-Printing / 3D Drucken (vgl. Abschn. 3.4.5.5)					
Poly Jet Modeling (vgl. Abschn. 3.4.5.6)					
Layer Laminate Manufacturing (vgl. Abschn. 3.4.5.7)					

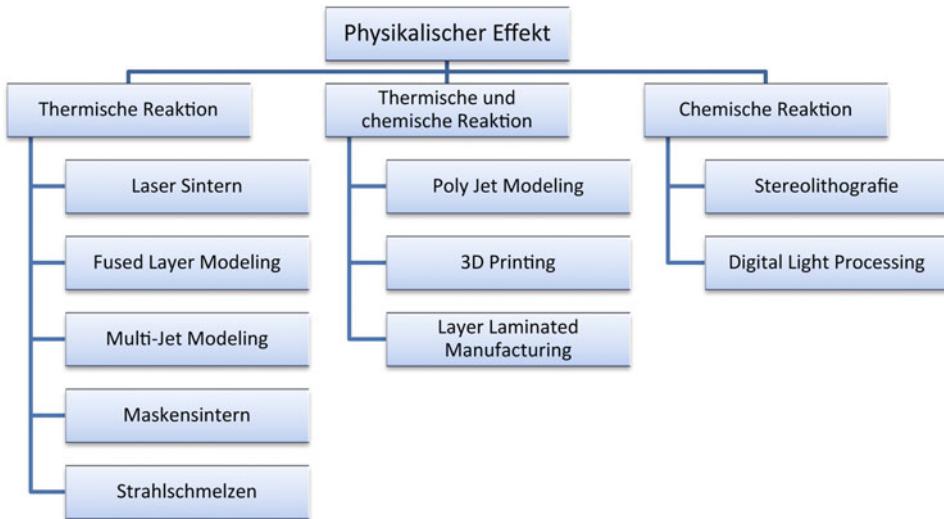
**Abb. 3.23** Klassifikation der wesentlichen Generativen Verfahren nach den derzeit eingesetzten typischen Materialien (in Anlehnung an N.N. 2007)

### 3.4.4 Klassifikation der Generativen Fertigungsverfahren

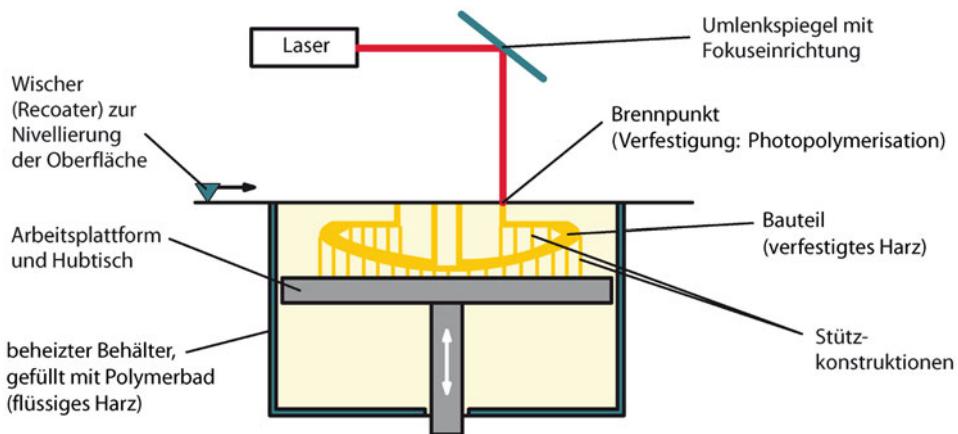
Die Generativen Fertigungsprozesse lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten systematisieren. Mögliche Gliederungskriterien sind

- Zustand der Ausgangsmaterialien: flüssig, fest (pulver-, granulat-, draht- oder folienförmig) (s. Abb. 3.19),
- Verfahrensprinzipien: Polymerisation, Bindemittel und eine Komponente, Aufschmelzen, Schichtenkleben (s. Abb. 3.19),
- typische Materialien: Papier, Kunststoff, Formsand, Metall, Keramik (s. Abb. 3.23),
- physikalischer Effekt: thermisch, chemisch, thermisch und/oder chemisch (s. Abb. 3.24) und
- Anwendungsbereiche: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing.

Im Folgenden wird auf die wichtigsten Verfahrensprinzipien, deren Vor- und Nachteile sowie Anwendungsbereiche eingegangen.



**Abb. 3.24** Klassifikation der wesentlichen Generativen Verfahren nach dem physikalischen Effekt



**Abb. 3.25** Prinzipdarstellung Stereolithografie (vgl. N.N. 2007; Hoyer et al. 2006)

### 3.4.5 Verfahrensbeschreibungen

#### 3.4.5.1 Stereolithografie (SLA, SL)

**Verfahrensprinzip** Als Urvater der Generativen Verfahren gehört die *Stereolithografie* (SLA, SL) zu den bekanntesten und am weitesten verbreiteten Technologien. In einem mit flüssigen, lichtaus härrenden Kunststoff gefüllten Bad (dem sog. Harzbad) entsteht durch schichtweise Materialverfestigung (Polymerisation) das Bauteil. Unter Einwirkung ultravioletter (UV-) Strahlung mittels Laser (s. Abb. 3.25) werden die flüssigen oder

pastösen Monomere polymerisiert und in ein ausgehärtetes Polymer umgewandelt. Nach Verfestigung der jeweils oberen Schicht wird die Plattform um den Betrag einer Schichtdicken (Standardschichtdicke im Bereich von 0,05 bis 0,25 mm) abgesenkt. Mittels eines Wischers wird die Flüssigkeit für die nächste Schicht darauf gleichmäßig verteilt. Danach erfolgt erneut das Aushärten der neuen Schicht. Die Arbeitsvorgänge wiederholen sich für jede Schicht bis zum fertigen Bauteil.

Der Stereolithografie bezüglich des physikalischen Effektes sehr ähnlich, jedoch mit abweichendem Aufbau, sind weitere Verfahren wie *Digital Light Processing* (DLP) oder *Poly Jet Modeling* (PJM) (vgl. Abschn. 3.4.5.6), bei denen die Aktivierungsenergie mittels einer oder mehrerer Lampen aufgebracht wird.

## Vorteile

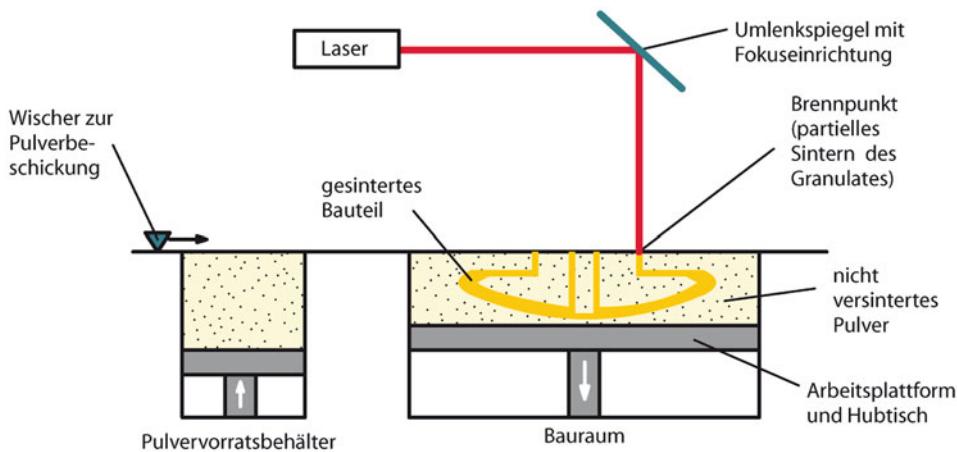
- Durch die Verwendung von flüssigen Epoxydharzen entstehen Bauteile mit sehr glatten und dichten Oberflächenstrukturen,
- sehr genaues Fertigungsverfahren, aufgrund niedriger Bautemperatur (ca. 25 °C) tritt kein oder nur geringer Verzug des Werkstücks auf,
- besondere Eignung für Bauteile mit sehr komplexen und dünnwandigen Strukturen,
- Wiederverwendbarkeit des nicht vernetzten Materials eines Bauprozesses,
- gute Nachbehandlungsmöglichkeiten der Bauteile durch Lackierung o. ä. möglich.

## Nachteile

- Stützkonstruktion für Überhänge/Hinterschnitte notwendig, manuelle Entfernung im Nachbearbeitungsprozess erforderlich,
- nur begrenzte Materialvielfalt aufgrund des genutzten lichtaushärtenden Effektes möglich und
- je nach Bauteilkomplexität kann ein anschließendes Aushärten in einer Nachvernetzungskammer erforderlich werden.

## Anwendungen

- Konzept-/Geometrieprototypen als Anschauungsmodelle oder zur Beurteilung der Form und Dimensionen sowie zur Vorbereitung von Fertigungs- und Montagevorgängen,
- Funktionsprototypen zur Beurteilung gezielter Produkteigenschaften sowie als Urmodell für Folgeprozesse (z. B. Silikon-Vakuumguss, Polyamidguss oder Feinguss),
- weite Verbreitung in Industrie- und Medizinbereich und
- dient der Untersuchung von Strömungsverhalten von Flüssigkeiten aufgrund der Verwendbarkeit von transparenten Werkstoffen.



**Abb. 3.26** Prinzipdarstellung Laser Sintern (vgl. N.N. 2007; Hoyer et al. 2006)

### 3.4.5.2 (Selektives) LaserSintern (SLS, LS)

Das *LaserSintern* (LS) ist bekannt geworden unter der Bezeichnung *Selektive Laser Sintering* (SLS). 1986 von Carl Deckard an der University of Texas entwickelt, wurde es 1992 erstmalig kommerziell auf dem Markt eingesetzt. Im Zuge des Standardisierungsprozesses hat man sich auf die Verwendung des allgemeingültigen und firmenunabhängigen Begriff des Laser Sinterns geeinigt (vgl. N.N. 2007).

**Verfahrensprinzip** Beim Laser Sintern wird pulver- oder granulatformiges Ausgangsmaterial verwendet. Eine auf die Arbeitsfläche aufgebrachte Pulverschicht wird entsprechend der Schnittebene der Bauteilgeometrie in einer inerten Atmosphäre mit einem Laserstrahl belichtet. Ohne hohen Druck und lange Diffusionszeit, welche die beiden wichtigsten Komponenten beim konventionellen Sintervorgang sind, werden die einzelnen Pulverpartikel durch die kurzzeitige thermische Aktivierung des Laserstrahls teilweise lokal angeschmolzen und nach Abkühlung miteinander zu einer festen Schicht versintert (Gebhardt 2007; Deckard 1988). Danach erfolgt die Absenkung der Bauplattform um eine entsprechende Schichtdicke (ca. 0,1-0,2 mm). Durch einen Rakel- oder Rollenmechanismus wird eine neue gleichmäßige Pulverschicht auf die vorher verfestigte Schicht aufgebracht. Dann erfolgt erneut ein Bestrahlen und Zusammenfügen der losen Partikel miteinander. Gleichzeitig wird diese Schicht mit der darunterliegenden verbunden. Diese Arbeitsschritte werden bis zur Fertigstellung des Endproduktes wiederholt (s. Abb. 3.26).

Dem Laser Sintern ähnlich ist das *MaskenSintern* (MS), das zum lokalen Schmelzen des Materials anstelle des Lasers einen Infrarotstrahler verwendet. Der Verfahrensaufbau und -ablauf weicht zudem durch die Verwendung einer Tonermaske als Schablone beim Bestrahlungsvorgang vom Laser Sintern ab.

Als verfügbare Pulvermaterialien können Kunststoffe, Wachse, Formsande (phenolharzgetränkte Aluminium-Silikat- oder Quarz-Formsande) und verschiedene Metallegie-

rungen zum Einsatz kommen. Besonders in den letzten Jahren ist die Beherrschung des Verfahrens für die Verwendung von Metallpulvern gereift (vgl. Deckard 1988; Exner und Ebert 2008; Aumund-Kopp et al. 2008).

### Vorteile

- Stützkonstruktion für Überhänge/Hinterschnitte ist nicht erforderlich, da das ungeschmolzene Pulver die Funktion der Abstützung übernimmt. Es kann nach dem Bauprozess sehr einfach entfernt werden,
- sehr gute Beherrschbarkeit von Kunststoffen und Wachsen mit niedriger Schmelztemperatur,
- Herstellung von Bauteilen mit guter Maßhaltigkeit,
- Wiederverwendbarkeit des nicht aufgeschmolzenen Materials eines Bauprozesses,
- Fertigung komplexer Geometrien mit integrierter Funktion möglich (z. B. bewegliche Scharniere, Schnappverbindungen etc.),
- Bauteile sind thermisch und mechanisch hoch belastbar,
- verwendete Kunststoffe sind einfärbbar und
- biokompatible und lebensmittelechte Kunststoffe sind verfügbar.

### Nachteile

- Aufgrund des Pulvereinsatzes Einschränkungen im Detaillierungsgrad und der Oberflächengüte,
- Verbesserung der Oberfläche durch Folgeprozesse möglich und
- zur Vermeidung der Oxidation des Materials muss der Bauprozess in einer Inertgas-Atmosphäre durchgeführt werden.

### Anwendungen

- Einsatz als Design-/Geometrie- sowie Funktionsmodelle in Industrie-, Lebensmittel- und Medizinbranche,
- Herstellung von Bauteilen mit hohen Anforderungen möglich (Temperatur-, mechanische und chemische Beständigkeit),
- gute Eignung für mechanische Versuchsreihen, Clipverschlüsse und andere Fügeelemente zur einfachen Funktionsüberprüfung,
- Formeinsätze bei Gussverfahren (z. B. Spritz- oder Druckguss),
- Verwendung in kleinen Serien für technische Kunststoffteile und auch metallische Ersatzteile und
- wirtschaftliche Alternative für Endprodukte in der Serienfertigung.

### 3.4.5.3 Strahlschmelzen

Das Strahlschmelzen ist ebenso bekannt unter den Bezeichnungen Laser Forming, Selective Laser Melting (SLM), Laser Cusing, Electro Beam Melting (EBM) oder Direct Metal Laser Sintern (DMLS).

**Verfahrensprinzip** Besonders in den letzten Jahren wurde das Strahlschmelzen zur Herstellung von metallischen Bauteilen intensiv erforscht und weiterentwickelt. Das Verfahrensprinzip ist dem des Laser Sinterns sehr ähnlich (s. Abb. 3.26). Ein offensichtlicher Unterschied zum Laser Sinter Verfahren liegt darin, dass das Pulver ohne Zusätze von Binde- oder Flussmitteln lokal vollständig durch Laser ohne Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird. Durch nachfolgende Erstarrung entsteht eine feste Schicht, welche auch beim Erstarren gleichzeitig mit dem bereits gefertigten Bereich des Objektes verbunden wird. Eingesetzt werden können verschiedene Serienwerkstoffe, deshalb ist dieses Generative Fertigungsverfahren zur Herstellung von Werkzeugen oder Endprodukten aus Metall von großer Bedeutung. Durch die Realisierbarkeit sehr komplexer Geometrien und zudem innerer Hohlraumstrukturen entwickelt sich das Verfahren zu einer ernst zu nehmenden Alternative zu den konventionellen Fertigungsverfahren wie Fräsen oder Gießen. Zudem sind Strukturen realisierbar, die mit anderen Verfahren nahezu nicht herstellbar sind.

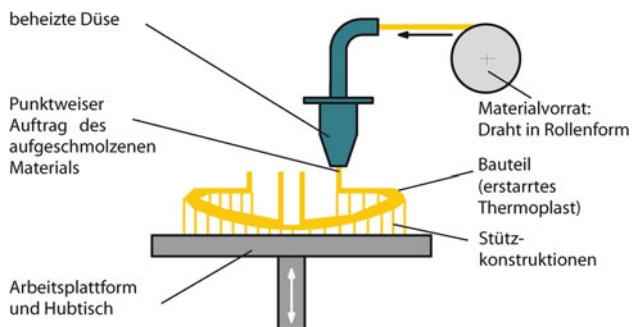
#### Vorteile

- Fertigung komplexer Bauteile mit inneren Strukturen aus Metall(-legierungen) möglich, aufgrund des in der Regel vollständigen Aufschmelzens des Materialpulvers kann eine nahezu porenl- und rissfreie Struktur aufgebaut werden. Die mechanischen Eigenschaften entsprechen denen des Grundwerkstoffes (konventionell hergestellter Teile) und sind damit hoch belastbar,
- Stützkonstruktion für Überhänge/Hinterschnitte ist nicht erforderlich, da das ungeschmolzene Pulver die Funktion der Abstützung übernimmt und
- Wiederverwendbarkeit des nicht aufgeschmolzenen Materials eines Bauprozesses.

#### Nachteile

- Das durch den Bauprozess bedingte Ankleben benachbarter, nicht geschmolzener Partikel an der Kontur des Bauteils kann zum Teil die Bauteilgenauigkeit sehr stark beeinflussen und macht zur Verbesserung der Oberfläche Nachbearbeitungsprozesse (Mikrostrahlen, Laserstrahlabtragen, Laserstrahlumschmelzen, PVD Beschichten etc.) erforderlich,
- zur Vermeidung der Oxidation des Materials muss der Bauprozess in einer Inertgas-Atmosphäre durchgeführt werden und
- relativ hohe Investitionskosten aufgrund der hohen Anforderungen an die Anlagen, das Metallpulver bis auf den Schmelzpunkt erhitzt zu können.

**Abb. 3.27** Prinzipdarstellung Fused Layer Modeling/  
Manufacturing (vgl. N.N. 2007;  
Hoyer et al. 2006)



## Anwendungen

- Werkzeuglose Herstellung metallischer Bauteile mit komplexer Geometrie und metallischer Funktionsmodelle,
- Herstellung von Werkzeugen, Formen und Formeinsätzen mit konturnahen Kühlkanälen,
- Fertigung von hochbelastbaren Bauteilen aus Serienmaterial als Einzelstück oder in Kleinserie und
- Anwendungen in Automobilindustrie und Automobilzulieferindustrie, Luft- und Raumfahrt, Herstellung von Implantaten und Prothesen im Medizinbereich, Schmuckindustrie.

### 3.4.5.4 Fused Layer Modeling/Manufacturing (FLM)

**Verfahrensprinzip** Die generativen thermischen Extrusionsverfahren werden allgemein als *Fused Layer Modeling/Manufacturing* (FLM) bezeichnet. Bekannt geworden ist diese Verfahrensgruppe unter der Bezeichnung *Fused Deposition Modeling* (FDM). In diesem Verfahren wird meist drahtförmiges Ausgangsmaterial einer beheizten Düse zugeführt und aufgeschmolzen. Anschließend wird das in flüssige oder teigige Form verwandelte Bauteilmaterial geometrisch definiert auf die Bauplatte aufgebracht (s. Abb. 3.27). Der Zusammenhalt zwischen den einzelnen Extrusionsraupen, ebenso zur darunterliegenden Schicht, ergibt sich aufgrund des Stoffschlusses beim Erkaltungsprozess, wodurch auch das Bauteil die Festigkeit erhält. Ähnlich wie bei anderen Generativen Verfahren wird der Arbeitsvorgang zum schichtweisen Anfertigen des Bauteils wiederholt bis zur Fertigstellung des Bauteils.

Der Verfahrensgruppe FLM kann ebenso das *Multi-Jet Modeling* (MJM) zugeordnet werden, das anstatt *einer* Aufschmelz- und Extrusionsdüse einen beheizten Druckkopf mit mehreren Düsen zum Aufsprühen von kleinen Tropfen verwendet.

## Vorteile

- Produktion eines großen Volumens in relativ kurzer Fertigungszeit mit relativ einfacher technischer Umsetzung möglich,

- ein nachträgliches Aushärten nach Fertigstellung des Bauteils ist nicht nötig,
- weite Materialvielfalt realisierbar,
- die im Verfahren verwendeten Materialien können ähnlich oder chemisch identisch mit den später in der Produktion eingesetzten Serienwerkstoffen sein und vollständig ausgenutzt werden und
- Verwendung von mehreren Materialien in einem Bauprozess kann beim Einsatz von mehreren Düsen realisiert werden.

### Nachteile

- Stützkonstruktion für Überhänge/Hinterschnitte notwendig, manuelle Entfernung im Nachbearbeitungsprozess erforderlich,
- durch das Zusammenfügen von Extrusionsraupen ist die Oberflächenqualität der Bauteile relativ gering. Zudem hat der extrudierte Strang einen Anfang und ein Ende, deshalb entsteht ein sichtbarer Ansatz beim Schließen der Kontur und
- Strukturen, die feiner als die Extrusionsdicke sind, sind durch das Verfahren nicht realisierbar. Der maximal erreichbare Detaillierungsgrad wird vom Materialquerschnitt begrenzt.

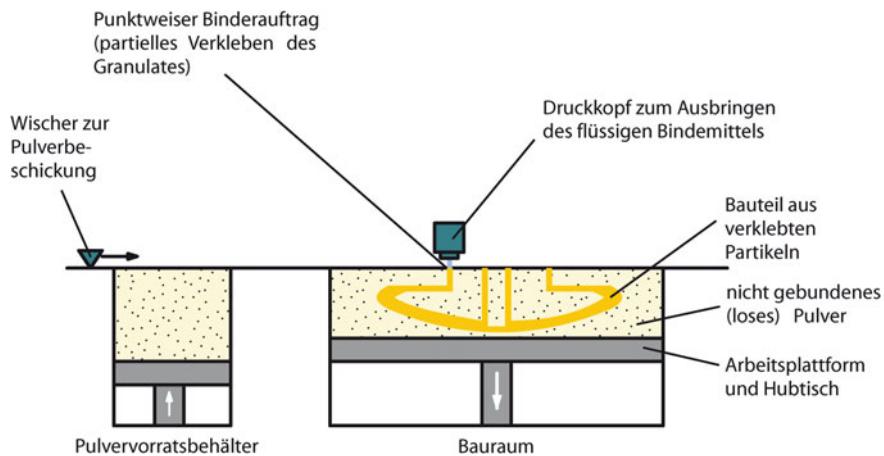
### Anwendungen

- Besonders geeignet für große und flache Bauteile und
- aufgrund der Materialvielfalt für Konzeptmodelle, Funktionsprototypen, Werkzeuge sowie Endprodukte industriell eingesetzt.

#### 3.4.5.5 Dreidimensionales Drucken/3D-Printing (3DP)

**Verfahrensprinzip** Das auf der Tintenstrahltechnologie basierte *dreidimensionale Drucken* (3DP) beinhaltet ein Pulver-Binder-Verfahren, das ausgehend vom Patent des MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA) entwickelt wurde. In einem mit LaserSintern vergleichbaren Bauprozess wird ebenso ein pulverförmiger Ausgangsstoff eingesetzt. Jedoch werden die Pulverpartikel schichtweise miteinander verklebt, indem ein Binder bzw. chemischer Aktivator über einen Druckkopf oder mehrere Druckköpfe auf die Pulverschicht entsprechend der jeweiligen gewünschten Schichtkontur aufgespritzt wird. Nach Fertigstellung einer Baulage wird durch die Anhebung des Pulver-Vorratsbehälters und die Absenkung der Plattform in der Baukammer mittels eines Wischers die nächste Pulverschicht aufgebracht (s. Abb. 3.28).

Die momentan zu verarbeitenden Materialien basieren entweder auf Stärke und Gips oder sind gießereiübliche Sande zur Herstellung von Formen. Ebenso ist der Einsatz von metallischen Ausgangsstoffen, meist Edelstahlpulver, zur Herstellung eines sog. *Grünlings* für Folgeprozesse möglich.



**Abb. 3.28** Prinzipdarstellung 3D-Printing (vgl. N.N. 2007; Hoyer et al. 2006)

### Vorteile

- Stützkonstruktion für Überhänge/Hinterschnitte ist nicht erforderlich, da das nicht verklebte Pulver die Funktion der Abstützung übernimmt. Es kann nach dem Bauprozess einfach entfernt werden,
- Wiederverwendbarkeit des nicht verklebten Materials eines Bauprozesses,
- Investitionskosten für Anlagentechnik und Material sind relativ gering, da keine Energiequelle (Laser, Lampe) zum Aufschmelzen o. a. erforderlich ist und
- beim gleichzeitigen Einbringen verschiedenfarbiger Binder ist die Herstellung von durchgefärbten Bauteilen sowie Bauteilen mit Farbverläufen möglich und bereits am Markt eingesetzt.

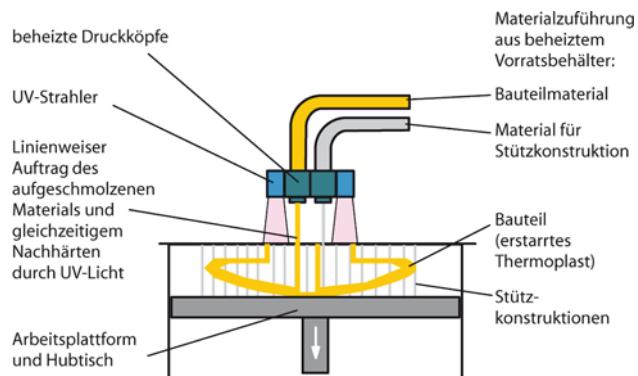
### Nachteile

- Maßhaltigkeit und Detailgenauigkeit der Bauteile sind eingeschränkt und
- nachfolgende Infiltrierprozesse – abhängig vom Werkstoff ggf. noch Verfestigung im Ofen – sind erforderlich, um mechanische Belastbarkeit der Bauteile zu erhöhen.

### Anwendungen

- Aufgrund der eingeschränkten Maßhaltigkeit und Belastbarkeit hauptsächlich als einfarbige oder mehrfarbige Anschauungsmodelle für Industrie-, Architektur- und Medizinanwendungen eingesetzt,
- vollfarbige Darstellung der Ergebnisse von Finite-Elemente-Analysen oder Topografie-Modellen möglich,
- metallische Grünlinge für Folgeprozesse und
- Formen und Kerne für Sand- und Feinguss.

**Abb. 3.29** Prinzipdarstellung Poly Jet Modeling (vgl. N.N. 2007; Hoyer et al. 2006)



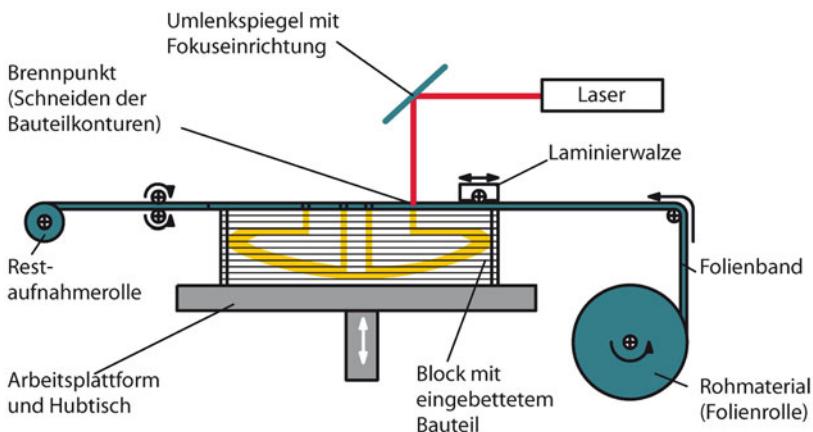
### 3.4.5.6 Poly Jet Modeling (PJM)

**Verfahrensprinzip** Das *Poly Jet Modeling* (PJM) stellt im Grunde eine Kombination der bereits eingesetzten Verfahren dar. Ebenso wie die Stereolithografie nutzt das Verfahren die Polymerisation zur Vernetzung und Fertigung von Bauteilen. Anstelle kostenintensiver Lasertechnik wird das Material mittels eines horizontal beweglichen und erhitzten Druckkopfes, der aus mehreren Segmenten und einer Vielzahl von Düsen besteht, zuerst verflüssigt und dann in dünnen Schichten aufgespritzt. Die das Verfahren nutzenden Anlagen verbauen in der Regel mindestens zwei unterschiedliche Materialien für die Modellkonturen und die Stützstruktur. Einige Anlagen ermöglichen bereits das gleichzeitige Verbauen von zwei Modell- und einem Stützmaterial. Das UV-empfindliche Modellmaterial wird direkt nach dem Aufdrucken – und noch während des Druckens des nächsten Bereiches – durch die am Druckkopf installierten UV-Lampen vollständig ausgehärtet (s. Abb. 3.29). Nach jeder Schicht wird die Bauteilplattform um eine Schichtdicke abgesenkt, und die Fertigung einer neuen Schicht beginnt. Nach der Fertigstellung des gesamten Bauteils wird das geleertartige Stützmaterial mit Hilfe eines Wasserstrahls entfernt.

Die das Poly Jet Modeling nutzenden Anlagen konnten sich besonders in den vergangenen Jahren in vielen Bereichen auf dem Markt etablieren.

### Vorteile

- Bauteile mit sehr glatten und dichten Oberflächenstrukturen sowie extrem guter Maßhaltigkeit,
- besondere Eignung für Bauteile mit sehr komplexen und dünnwandigen Strukturen,
- aufgrund der verfügbaren Materialien und der Möglichkeit des gleichzeitigen Verbauens ist die Herstellung einer Vielzahl von Materialkombinationen mit unterschiedlichen Eigenschaften möglich,
- kein anschließendes Aushärten erforderlich und
- gute Nachbehandlungsmöglichkeiten der Bauteile durch Lackierung o. Ä. möglich.



**Abb. 3.30** Prinzipdarstellung Layer Maminated Manufacturing (vgl. N.N. 2007; Hoyer et al. 2006)

### Nachteile

- Stützkonstruktion für Überhänge/Hinterschnitte notwendig, Entfernung jedoch durch die Verwendung eines speziellen Stützmaterials erleichtert.

### Anwendungen

- Weitreichende Anwendungen als Konzeptmodelle, Funktions- sowie Fertigungsmodelle in Industrie- und Automobilbereich, Elektronik- und Konsumgüterindustrie, Medizin- und Dentalbereich, Schmuckindustrie, Architektur u. a. und
- spezielle Materialien für die verschiedensten Anwendungen: unterschiedliche Temperatur- und Härtebereiche (harte bis hin zu silikonartige Bauteile und deren Kombination), bestimmte Eigenschaften im Medizinbereich (z. B. Hautverträglichkeit), unterschiedliche Farben bis hin zu transparentem Material.

#### 3.4.5.7 Layer Laminated Manufacturing (LLM)

Das *Layer Laminated Manufacturing* (LLM) ist bekannt geworden unter der Bezeichnung *Laminated Object Manufacturing* (LOM). Im Zuge des Standardisierungsprozesses hat man sich auf die Verwendung des allgemeingültigen und firmenunabhängigen Begriffs LLM geeinigt.

**Verfahrensprinzip** Beim *Layer Laminated Manufacturing* wird das vorgefertigte Ausgangsmaterial in Folienform schichtweise aufeinandergelegt und zusammengefügt, um ein physisches Modell zu fertigen. In jeder Lage wird entsprechend der Schnittinformation jeweils die Kontur des Bauteils mit Laserstrahl (s. Abb. 3.30), Messer oder konventionellem Schneidwerkzeug nach der Schichtinformation geometrisch definiert ausgeschnitten.

Mit dem in Abb. 3.30 gezeigten Mechanismus wird das von der Unterseite mit Heißkleber beschichtete Papier auf die Bauplattform bzw. auf das unterliegende teilstiftige Modell aufgebracht und mittels einer heißen Laminierwalze aufgeklebt. Um das Bauteil nach der Fertigstellung aus dem übrigen festen Material herauslösen zu können, werden beim Herstellungsprozess auch die nicht zum Bauteil gehörenden Bereiche des Baublocks mit dem Schneidwerkzeug zerteilt.

Am Markt werden hauptsächlich Papierfolien und Kunststofffolien verwendet. Bei der Verwendung von Kunststofffolien wird zum Teil zusätzlich in jeder Schicht zwischen den zu entfernenden Bereichen ein sog. Anti-Kleber (Anti-Glue) aufgebracht, der das Verkleben dieser Bereiche verhindert und somit ein Entfernen ermöglicht. Bei diesen Geräten ist der Bauraum zudem meist leicht beheizt, um die Klebe- bzw. Antiklebprozesse zu beschleunigen. Das Aufkleben kann auch durch Polymerisation (Solid Foil Polymerisation) oder galvanisch (Electrosetting) erfolgen.

Neben Kunststoff- und Papierfolien ist auch die Verarbeitung von Metall-Lamellen möglich. Dabei werden die Metallschichten durch Laserschweißen fixiert und durch Diffusions- und Ultraschallschweißen miteinander flächig verbunden (Gebhardt 2007).

### Vorteile

- Schnelle und günstige Bearbeitung von massiven Bauteilen,
- keine zusätzliche Stützkonstruktion notwendig, da das Restmaterial die Bauteilkonturen stützt und
- Materialkosten vergleichsweise niedrig gegenüber anderen Generativen Verfahren.

### Nachteile

- Relativ aufwändiger Nachfolgeprozess zum Ausformen bzw. Nachbehandeln der Bauteile (zum Teil Oberflächenversiegeln durch Lackieren bei Papierverwendung) erforderlich,
- abhängig von den zu bauenden Objekten und der Anordnung im Bauraum fallen zum Teil erhebliche Mengen von Abfall an,
- Verfahren ungeeignet für dünnwandige Bauteile,
- Detailgenauigkeit und Maßhaltigkeit relativ grob im Vergleich zu anderen Verfahren,
- wegen des Fügemechanismus sind die mechanischen Eigenschaften in Schichtrichtung und quer dazu sehr unterschiedlich und
- flache Schrägen mit Stufenbreiten größer als der Schneidspalt und schlecht zugängliche, interne Bohrungen sind mit diesem Verfahren schwer realisierbar.

### Anwendungen

- Konzept- und Geometriemodelle, besonders geeignet für massive und große Bauteile,
- LLM-Bauteile aus Papier sind geeignet als Gießmodelle oder Gießform für Sandguss und andere Gießverfahren und

- LLM-Bauteile aus Papier sind im infiltrierten Zustand durch die dadurch erzielte Druckfestigkeit besonders geeignet als Stempel oder Matrize für Pressvorgänge oder Innenhochdruckumformen.

### 3.4.6 Prozessketten beim Einsatz von Generativen Fertigungsverfahren

Unter *Prozesskette* wird hier eine geordnete Folge von Prozessschritten verstanden, die an einem *Arbeitsgegenstand* zum Zwecke der geometrischen, technologischen und/oder informationstechnischen Zustandsänderung vollzogen wird. Unter *Arbeitsgegenstand* ist dabei ein Bauteil oder dessen informationstechnische Darstellung (Produkt- bzw. Bauteilbeschreibung) zu verstehen (Kaschka 1999).

Der Einsatz von Generativen Fertigungsverfahren erfordert neuartige Prozessketten im Produktionsbereich, die grundsätzliche Unterschiede zu konventionellen Herstellungsprozessketten aufweisen. Von den virtuellen 3D-Datensätzen bis zu einem physischen Bauteil können die mit Generativen Verfahren integrierten *Produktionsprozesse* *einstufig direkt*, *mehrstufig direkt* und *indirekt* sein (s. Abb. 3.31).

Bei *einstufigen direkten Prozessen* sind die Teile aus der Generativen Fertigungsanlage – ggf. nach Stützentfernung und Reinigung – als Endprodukte einsatzbereit. Der Unterschied zu *mehrstufigen direkten Prozessen* liegt darin, dass nach der Generativen Fertigung die entsprechenden Nachbehandlungsprozesse wie z. B. Infiltration, Härtung usw. angeschlossen werden, um bestimmte Eigenschaften zu erzielen.

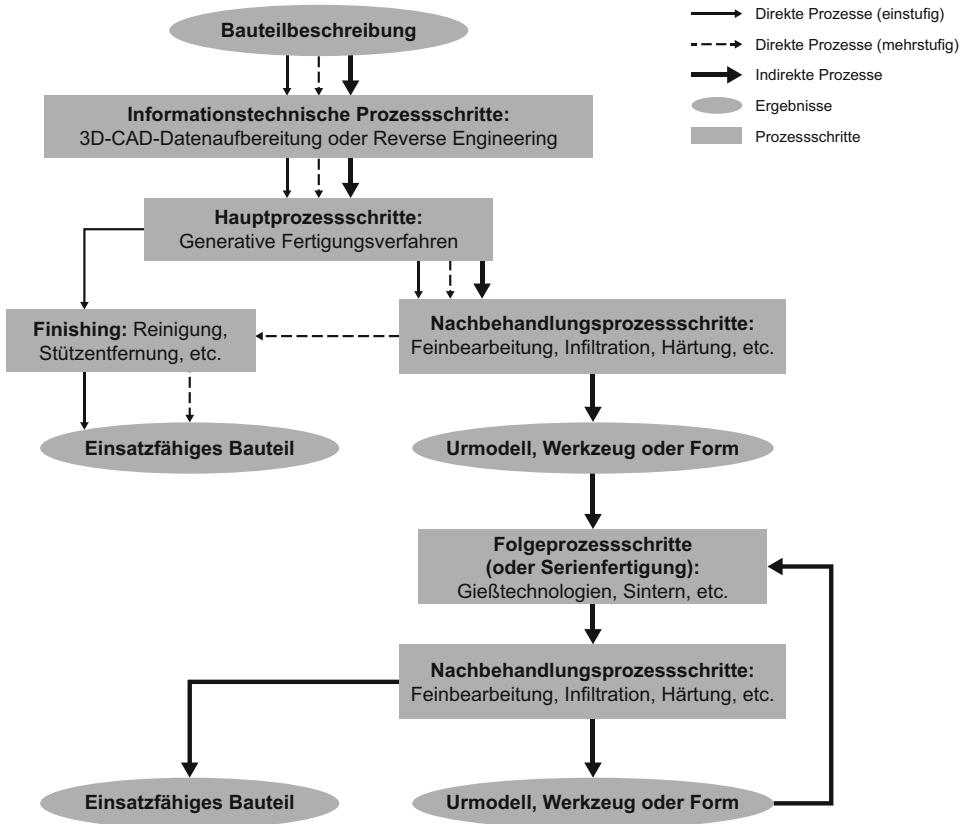
Die bei *indirekten* Generativen Fertigungsprozessen erstellten Teile werden als Urmodelle (Transfermodelle (N.N. 2007)) oder direkt als Formeinsätze verwendet. Formeinsätze sind Werkzeuge, die im nachfolgenden Fertigungsschritt, wie z. B. dem Gießen, dazu benutzt werden, Endprodukte herzustellen. In diesem Anwendungsbereich sind die Begriffe *direktes Rapid Tooling* und *indirektes Rapid Tooling* geprägt worden, die in Abschn. 3.4.7.2 erläutert werden.

#### 3.4.6.1 Prozessketten für Kunststoffbauteile

Einzeln oder in geringer Stückzahl benötigte Konzept-, Geometrie- oder Funktionsprototypen sowie serienidentische Endprodukte aus Kunststoff können direkt durch Generative Fertigungsverfahren und ggf. in Kombination mit entsprechenden Nachbehandlungen zur Eigenschaftsverbesserung (s. Abb. 3.32) hergestellt werden.

Für größere Stückzahlen von Kunststoffbauteilen ist der Einsatz der Gießverfahren als Folgeprozesse des generativen Prozesses von großer Bedeutung. Nachfolgend werden typische generative Prozessketten mit angepassten Gießverfahren vorgestellt.

**Prozesskette: Generativ erzeugte Urmodelle für Vakuumgießen** Wenn die Stückzahl in Größenordnungen von 5 bis 50 Teilen liegt und das Bauteilmaterial vergießbar ist, ist die Herstellung der Kunststoffprototypen in Vor- und Kleinserien durch diese Prozesskette schnell und kostengünstig (Gebhardt 2007). Nach der allgemeinen CAD-Modellierung und Datenaufbereitung wird das Urmodell des herzustellenden Bauteils durch Generative



**Abb. 3.31** Prozesskette der direkten und indirekten Prozesse (nach N.N. 2007; Kaschka 1999)

Ziel-Eigenschaft	Modifikation durch
Oberflächengüte und Geometrie	unterschiedlichste Schleifverfahren
physikalische Eigenschaften	Infiltrationsverfahren, Chemikalien
Oberfläche als Grenzfläche	Beschichten, Metallisieren
Haptik	Wassertransferdruck, Lackieren, Beledern

**Abb. 3.32** Nachbehandlungsprozesse bei Kunststoffteilen (nach N.N. 2007)

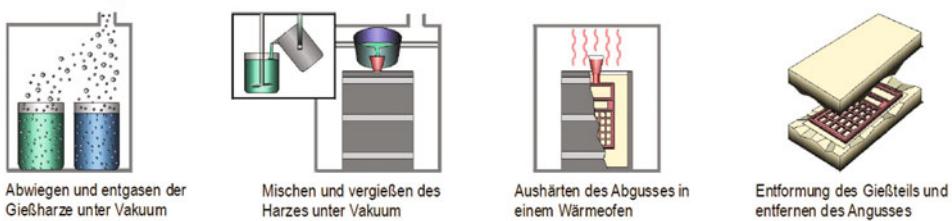
Verfahren	Bemerkungen	Nachbearbeitung
SLA (3.4.5.1)	Typisches RP-Verfahren zur Herstellung von Urmodellen mit feiner und komplexer Struktur	Supportentfernung; Reinigung und Nachhärten im UV- und Wärmeschrank bei SLA-
FLM (3.4.5.4)	geringere Genauigkeit als bei SLA	Teilen; Oberflächenfinish
Kunststoff-SLS (3.4.5.2)	geringere Genauigkeit als bei SLA	aufwändigere, oftmals manuelle Nachbearbeitungen zur Erzielung gießgerechter Genauigkeit und Oberflächengüte
LLM (3.4.5.7)	mit Papier	

**Abb. 3.33** Einsetzbare Generative Verfahren für die Herstellung von Vakuumguss-Urmodellen

#### Herstellung des Silikonwerkzeugs



#### Herstellung der Vakuum-Gießteile



**Abb. 3.34** Schematische Ablaufschritte beim Vakuumgießen (Homepage der Leotech GmbH, Deutschland 2010)

Verfahren erstellt. Die einsetzbaren Verfahren für die Herstellung von Urmodellen sind in Abb. 3.33 aufgelistet.

Abbildung 3.34 zeigt die Arbeitsschritte beim *Vakuumgießen*. Das am häufigsten verwendete Gießformmaterial, der Silikonkautschuk, wird nach Abkleben des Urmodells und Aufbau des Formkastens unter Vakuum in den Kasten eingegossen, um eine absolut blasenfreie Silikonform zu erhalten. Nachfolgend wird diese Silikongießform in einem Wärmeschrank bei Raumtemperatur vollständig ausgehärtet und danach an der Trennebene geöffnet. Dann wird das Urmodell entnommen.

Beim Vakuumgießen eingesetzte Gussmaterialien sollen bei niedrigen Temperaturen vergießbar sein und sich nur in geringem Maße abreibend gegenüber der Silikonform

**Abb. 3.35** Typische Vakuumgussteile aus PU-Harz:  
Gehäuseschale (Elektrobereich), Handgriff (Medizinbereich), Kunststoffschutzteil (Automobilbau), Autofelge (Modellbau), Handy-Gehäuse (Elektroindustrie), Urmodell (Werkzeugbau) (Homepage der Hördler rapid engineering-Prototypenbau, Deutschland 2010)



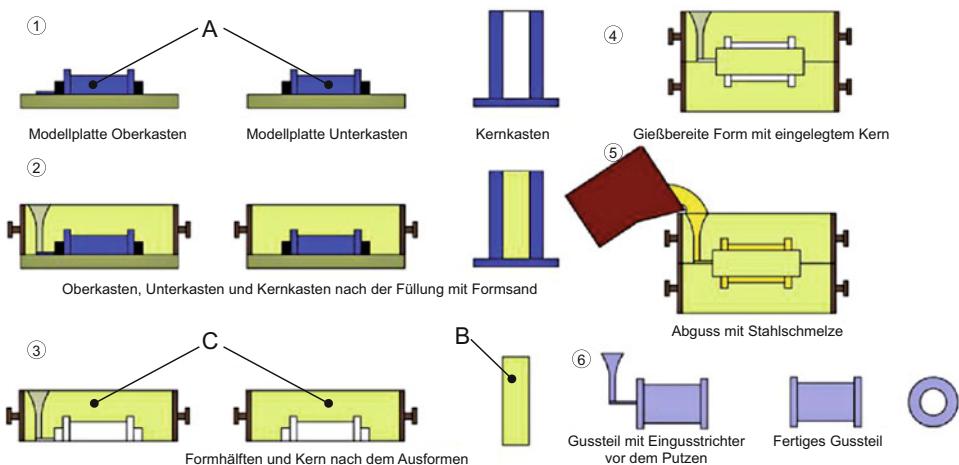
verhalten. Deshalb werden die Bauteile gewöhnlich mit Gießharzen aus zwei oder mehr Komponenten, wie Polyurethanen, Expoxid- und Polyesterharzen abgegossen.

Die Gießharzkomponenten werden in einer Vakuumumgebung gemischt und in die vorbereitete Gießform gegossen, wobei das Standvermögen einer Silikon-Gießform bei ca. 15–25 Stück liegt (Zäh 2006). Die produzierten Teile bleiben zum Zwecke des Aushärtens in einem Wärmeschrank. Die Herstellung von Hinterschnitten, Gewindebuchsen oder anderen Einlegeteilen ist unproblematisch. Die minimale Wandstärke liegt in Abhängigkeit vom Fließweg zwischen 0,5 und 1,0 mm (Homepage der PTZ-Prototypenzentrum GmbH, Deutschland 2010). Vor der Auslieferung des Produktes werden weitere Nachbehandlungen wie Tempern, Finishen, Strahlen, Einfärben, Lackieren, Polieren oder Beschichten nach Bedarf durchgeführt.

Vakuumgussteile lassen sich aus verschiedenen Materialien herstellen, mit ausgesuchten Gießharzen können so z. B. transparente, gummiähnliche oder wärmeformbeständige Formteile gefertigt werden, die Gehäuse, Abdeckungen, Dichtungen, Formrohre, Schläuche und sogar Verkleidungen für den Fahrzeug-Apparatebau sein können. Oftmals werden die Vakuumgussteile als Prototypen bzw. Vorserienmodelle in Maschinenbau-, Elektrotechnik-, Medizin- und Werkzeugbaubranchen angewendet, um die optischen, haptischen und funktionellen Eigenschaften des Endprodukts zu beurteilen. Abbildung 3.35 stellt typische Anwendungsbeispiele von Vakuumgussteilen dar. In Abschn. 3.4.7.1 werden unter dem Begriff *Rapid Prototyping* weitere praktische Beispiele angegeben.

### 3.4.6.2 Prozessketten für metallische Bauteile

Obwohl die direkte Herstellung von metallischen Prototypen und Endprodukten durch SLS- und SLM-Verfahren in den letzten 20 Jahren intensiv erforscht und erfolgreich entwickelt wurde, ist die Kombination von Generativen Verfahren und konventionellen Fertigungsverfahren am heutigen Markt noch immer sehr effektiv. Beispielsweise kann das generierte metallische Teil durch traditionelle Abgussverfahren, Spanen oder Erodieren bearbeitet werden, um ein kostengünstiges Endprodukt zu produzieren. Dabei spielt



**Abb. 3.36** Schematischer Ablauf des Sandgusses (Homepage der GussStahl Lienen GmbH & Co. KG, Deutschland 2010)

das Abgussverfahren für individuelle Metallteile besonders mit komplexer Geometrie in Vor- und Kleinserien die Hauptrolle. Hier werden Feinguss und Sandguss als typische Folgeverfahren zur Erstellung der Metallteile vorgestellt.

**Prozesskette: Generativ erzeugte Modelle, Formhälften oder Kerne für Sandgießen**

*Sandgießen* ist eines der ältesten Fertigungsverfahren und ein sehr wirtschaftlicher Prozess für die Erstellung von Metallteilen mit unterschiedlicher geometrischer Abmessung und Kompliziertheit. Es ist ein flexibles Gießverfahren für kleine und mittlere Seriengrößen. Die erreichbare Genauigkeit und Oberflächengüte sind relativ grob und liegen in Toleranzbereichen von 0,64 bis 64 mm in Abmessungsbereichen von 400 bis 10.000 mm (DIN ISO 8062 2003). Mit dem Einsatz von Generativen Verfahren ist Sandguss nicht nur für Einzelstücke oder geringe Stückzahlen, sondern auch für Teile mit komplexen Geometrien, die mit konventioneller Fertigung sehr schwer oder gar nicht realisierbar sind, günstig herstellbar geworden.

Entsprechend Abb. 3.36 werden beim Sandgießen Dauermodelle (A) benötigt, die in zwei Hälften gefertigt sind (1). Die beiden Modellhälften werden jeweils in einem Formkasten durch Auffüllen und Stampfen mit Formsand abgeformt (2). Nach Entnahme der Urmodellhälfte (3) werden die Ober- und Unterformhälften (C) ggf. mit dem eingelegten Sandkern (B) zusammen montiert (4). Im Anschluss wird die Metallschmelze vergossen, um das gewünschte Gussstück zu erhalten (5). Abschließend muss die Nachbearbeitung, das sog. Putzen, erfolgen, was die Entfernung der Steiger bzw. ein Oberflächenfinish beinhaltet (6), um ein einsatzfähiges Produkt zu gewinnen.

Die generativen Technologien lassen sich zur Herstellung von Dauermodellen, aber auch direkt von Formhälften oder Kernen wirtschaftlich geeignet einbinden. Die Verwendung von Kunststoffmaterialien oder Formsanden im Laser Sinter-Verfahren (Abschn. 3.4.5.2) oder 3D-Drucken (Abschn. 3.4.5.5) haben sich besonders bewährt. Ebenso eignet

**Abb. 3.37** Typische Sandgussteile (Homepage der Metallguss Rüther GmbH, Deutschland 2010)



sich das Papierlagen verbauende LLM-Verfahren (Abschn. 3.4.5.7), da es den traditionell verwendeten, holzähnlichen Modellen und Formen sehr nahekommt.

Beim direkten Herstellen von Formhälften und Kernen durch die Generativen Verfahren im Laser Sintern werden üblicherweise mit Phenolharz umhüllte Quarzsande oder mit Phenolharz umhüllte Aluminium-Silikat-Sande verwendet, letztere sind wegen ihrer hohen Wärmekapazität und niedrigen Wärmeausdehnung besonders für Hochtemperaturguss geeignet (Gebhardt 2007). Die beim 3D-Drucken verwendeten industrieerprobten Formsande enthalten Aktivatoren, die beim selektiven Aufbringen des Binders mit diesem reagieren und die Sandpartikel verbinden.

Üblicherweise werden die Sandgussteile mit Aluminium, Aluminium-Legierung, Kupfer und Kupfer-Legierung abgegossen. In Abb. 3.37 sind einige durch Sandformgießen hergestellte Werkstücke veranschaulicht, wobei die Gießeinrichtungen generativ hergestellt werden.

**Prozesskette: Generativ erzeugte, verlorene Modelle für Feingießen** Auf Basis des *Wachs-Ausschmelz-Verfahrens* zur Herstellung von komplizierten oder filigranen metallischen Serienformen mit extrem hoher Wiederholgenauigkeit in Maß und Qualität wurde das Feingießen als eines der ältesten wirtschaftlichen Gießverfahren langjährig entwickelt und verwendet. Die wichtigste Voraussetzung für ein Feingussteil ist ein qualitativ hochwertiges Urmödell bzw. verlorenes Modell. Traditionell wurde zunächst das Werkzeug aus Aluminium durch Fräsen und Montieren angefertigt, dann wurde das Wachs in das Werkzeug injiziert, um die Wachslinge herzustellen. Dieser Herstellungsvorgang der Wachsmodelle ist jedoch sehr zeit- und kostenaufwändig, weshalb der Feinguss meist nur in Massenfertigung kostengünstig eingesetzt wurde. Mit der Integration der Generativen Fertigungsverfahren in den Erstellungsprozess von verlorenen Modellen wird die Restriktion auf eine festgelegte Mindeststückzahl gelöst.

Für die Einbindung der Generativen Verfahren zur Herstellung von Wachslingen gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Einerseits wird mit einem generativ gefertigten Ur-

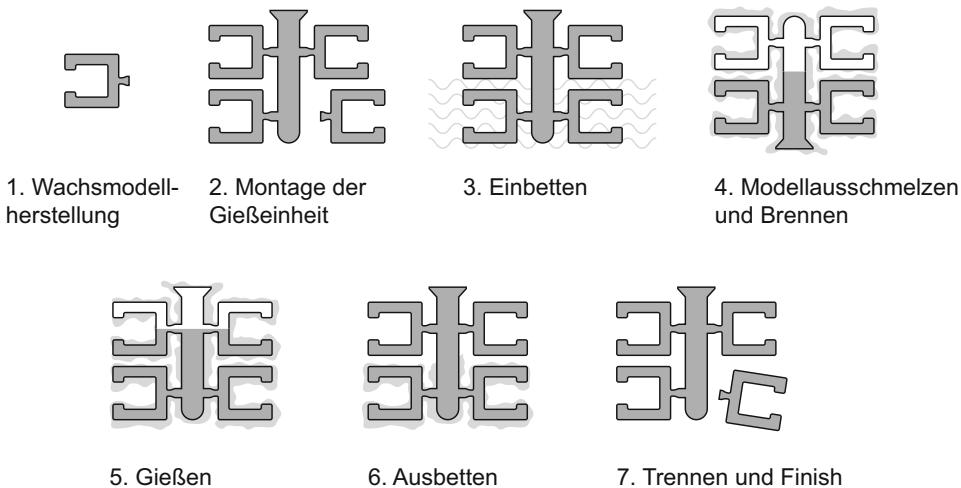
modell eine Silikonform wie beim Vakuumgießen (Abschn. 3.4.6.1) abgeformt. Durch Einspritzen oder Eingießen von Wachs in die Silikonform wird die Anzahl an benötigten Wachslingen gewonnen. Weil das Wachs weniger abrasiv als die Polyurethane beim Vakuumgießen ist, kann die herstellbare Anzahl von Wachsmodellen mit einer Silikonform in der Regel mehr als 50 Stück sein (nach Gebhardt 2007). Bei höchsten Anforderungen an die Oberflächenqualität oder bei Stückzahlen größer als 100 Stück ist es günstig, diese Modell-Herstellungsvariante zu wählen (nach Homepage der 1zu1 Prototypen GmbH & Co, Austria 2010).

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die verlorenen Wachsmodelle direkt generativ herzustellen. Diese Variante eignet sich besonders für die rasche Fertigung metallischer Prototypen und Kleinserien von 1 bis 100 Stück (nach Homepage der 1zu1 Prototypen GmbH & Co, Austria 2010) in hochwertiger Gussqualität. Zudem ist dieses Vorgehen bei großen Bauteilen wie Zylinderblöcken von Vorteil, die als Einzelstücke und nicht als Gießstraßen gegossen werden. Anstelle des Wachses sind die verlorenen Modelle häufig aus amorphen Kunststoffen, z. B. Polystyrol oder Polycarbonat, hergestellt, die nach dem Einbetten ausgeschmolzen und/oder ausgebrannt werden. Beim Ausbrennen des generativen Modells ist zu beachten, dass die Ausdehnung des Modells im Ausbrennvorgang zum Brechen der Keramikschale, dem „Shell-cracking“, führen kann. Um diesen nachteiligen Effekt zu verhindern, werden von den Anlagenherstellern bestimmte Hohlbauweisen der verlorenen Modelle empfohlen.

Zur Herstellung des Urmodells und des verlorenen Modells haben sich besonders die folgenden Verfahren bewährt: SLA (Abschn. 3.4.5.1), SLS (Abschn. 3.4.5.2), 3DP (Abschn. 3.4.5.5) und FLM (Abschn. 3.4.5.4). Beim LLM-Verfahren (Abschn. 3.4.5.7) sind die durch das direkte Ausbrennen des LLM-Modells entstehenden, hoch aschehaltigen Rückstände problematisch, deshalb wird eine zusätzliche Injektion des Wachses in die LLM-Bauteile durchgeführt.

Die allgemeinen Fertigungsschritte des Feingusses sind in Abb. 3.38 dargestellt. Nach der Modellerstellung werden die Wachsteile (1) an einem Wachsbaum (auch Gießtraube genannt) zusammengefasst (2). Dann wird der Wachsbaum in der Küvette positioniert. Konventionell wird der Wachsbaum in Keramikschlicker getaucht, besandet und getrocknet. Diese Arbeitsvorgänge werden bis zur Entstehung einer 4–8 mm dicken Keramikschicht wiederholt. Diese klassische Herstellung der Schalenform kann einige Tage dauern. Darüber hinaus wird eine Kompaktform entwickelt, bei der die Besandung der Oberfläche und die Hinterfüllung erfolgen. Mittlerweile lässt sich durch neue Technologien und Prozesse dieser Vorgang bereits auf wenige Stunden reduzieren. Nachdem die Wachsmodelle bzw. Wachsbäume in eine spezifische Keramikmasse eingebettet wurden (3), werden diese anschließend in einem mehrstündigen Temper-Prozess ausgeschmolzen und die Keramik wird zur Erreichung der notwendigen Temperaturfestigkeit gebrannt (4).

Ein sog. Differenz-Druck-Vakuum (DDV)-Feinguss wird von vielen Dienstleistern für Prototypen und Kleinserien angeboten. Dabei werden die Auffüllung der Küvette mit der Einbettmasse, das Aufschmelzen des Metalls (5) und der spätere Metall-Gießprozess unter Vakuum blasenfrei ausgeführt. Das Gießmetall kann mit einem SPS-gesteuerten (Unter-) Druck in dem Schmelziegel aufgeschmolzen werden und füllt im Gießvorgang das geschmolzene Metall durch Schwerkraft und spezifische Druckverhältnisse zwischen



**Abb. 3.38** Schematischer Ablauf beim Feingießen (Homepage der PTZ-Prototypenzentrum GmbH, Deutschland 2010)

Schmelz- und Gießkammer die Kavität aus. Nach erfolgter Formfüllung wird ein Nachdruck von bis zu 1,5 bar auf das Schmelzreservoir aufgegeben. Beim Schmelzen der Metalle und beim Nachdrücken können inerte Gase eingesetzt werden. Diese zusätzliche Druckkomponente gewährleistet eine Verringerung der Lunkerbildung (nach Homepage der PTZ-Prototypenzentrum GmbH, Deutschland 2010; Homepage der 1zu1 Prototypen GmbH & Co, Austria 2010). Nach dem Abgießen und Aushärten wird die Keramikform mittels Hochdruck-Wasserstrahlen zerbrochen bzw. ausgebettet (6) und das Gussstück entnommen, ggf. werden die einzelnen Teile von dem Gießbaum abgesägt. Je nach Anforderungen aus Kundensicht erfolgen geeignete mechanische Nachbearbeitungen (z. B. Fräsen, Drehen), um ein verkaufbares Endprodukt zu gewinnen (7).

Die Kombination von Generativen Verfahren und Feinguss ist besonders für die Herstellung von Bauteilen mit komplexen Geometrien bei relativ geringer Stückzahl in Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt und Motorsport von großer Bedeutung. Zahlreiche handelsübliche Legierungen, wie z. B. G-CuAl10Ni, G-ALSi9Cu3/G-ALSi10Mg3, AZ 91 (Magnesium), Zamak 410 und G-CuSn10/G-CuL45/GCuZn15Si4/G-CuZnSn5Pb usw., sind durch Feinguss vergießbar (Homepage der TEUFEL Prototypen GmbH). Einige Beispiele von Aluminium-Feingeschäften sind in Abb. 3.39 dargestellt.

### 3.4.7 Anwendungsgebiete und Beispiele im Industriebereich

Weil die ersten generativen Anwendungen aufgrund der Vermeidung des Werkzeugbaus deutlich schneller und auch billiger als traditionelle Verfahren waren, wurden generative Technologien als *Rapid Technologie* am Markt bekannt. Dabei bedeutet das englische Wort

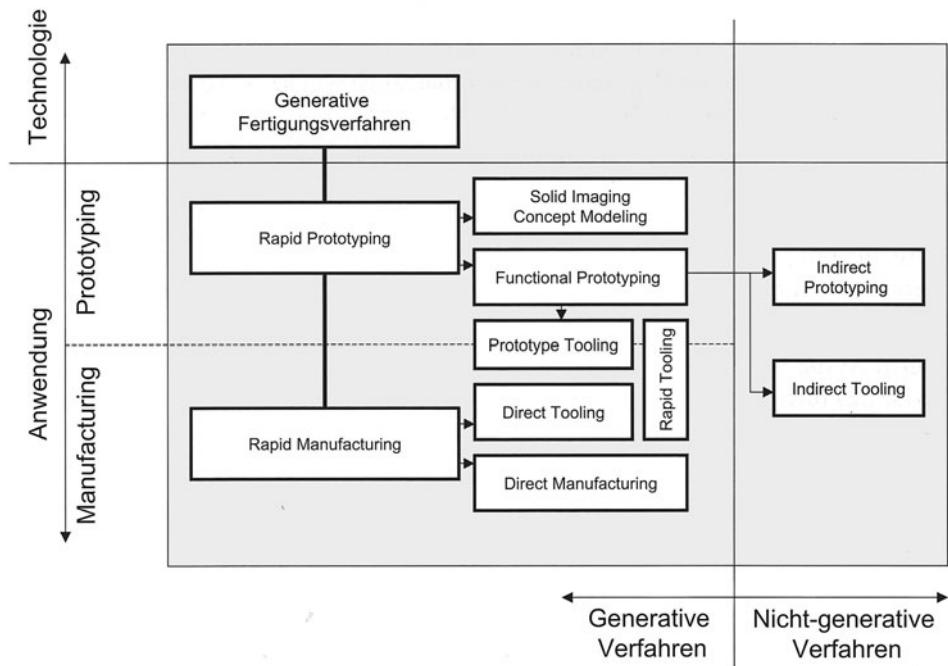


**Abb. 3.39** Typische Aluminium-Feingussteile (Homepage der ZOLLERN Aluminium-Feinguss Soest GmbH & Co. KG, Deutschland 2010)

„rapid“ schnell. Obwohl die Bezeichnung „Rapid Technologie“ heute noch häufig benutzt wird, sind tatsächlich mehrere Eigenschaften (z. B. Geometriefreiheit) neben Schnelligkeit als Kriterien bei Beurteilung der Generativen Verfahren von Bedeutung (nach N.N. 2007).

Mit der mehrjährigen Entwicklung der Generativen Verfahren gliedern sich die Anwendungsbereiche in Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing. Unter *Rapid Prototyping* (RP) versteht man die generative Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität (Prototypen, Versuchsteile). Dabei werden nur die ausgewählten Merkmale, z. B. Geometrie, Haptik, mittels der Modelle dargestellt. Material und Konstruktion der Prototypen müssen dabei nicht mit denen der Serienteile identisch sein. *Rapid Tooling* (RT) bezeichnet die Anwendung der generativen Methoden und Verfahren für den Bau von Werkzeugen und Formen. Bei *Rapid Manufacturing* (RM) werden die Endprodukte (auch als Serienteile bezeichnet) generativ hergestellt, dabei sollen das eingesetzte Material und die Konstruktion identisch mit dem Endprodukt sein. In diesem Abschnitt werden hauptsächlich diese Anwendungsbereiche anhand ausgewählter praktischer Beispiele im Industriebereich diskutiert (nach N.N. 2007).

Eine übersichtliche Einordnung dieser Begriffe der Anwendungsbereiche nach Gebhardt (2007) wird in Abb. 3.40 zusammengefasst. Nach Gebhardt (2007) bezeichnet Rapid Tooling technologisch keine eigene Anwendungsebene, weshalb die Herstellung von Formeinsätzen und Werkzeugen je nach erstelltem Teil als Prototype Tooling dem Rapid



**Abb. 3.40** Typische Struktur der generativen Technologie mit ihren Anwendungsbereichen (Gebhardt 2007)

Prototyping und als direktes Tooling dem Rapid Manufacturing zugeordnet wird. Hier bestehen die hergestellten Formeinsätze und Werkzeuge im Prototype Tooling aus Modell- und Prototypmaterialien. Außerdem bezeichnet das indirekte Rapid Tooling den Werkzeugbau mittels der mit generativen Verfahren integrierten Prozesskette, welche heute ein Entwicklungsschwerpunkt der modernen Fertigung ist.

### 3.4.7.1 Rapid Prototyping

Unter Prototypen versteht man nicht Produkte, sondern Muster oder Modelle mit bestimmten ausgewählten Produkteigenschaften, wie z. B. Aussehen, Haptik, Geometrie usw. In der Produktentwicklungsphase dient ein Prototyp zur Evaluierung der relevanten Eigenschaften, damit die Gefahr der späteren aufwändigen Änderungen des Produktes in der Fertigung verringert werden kann. Wegen einer relativ kurzen Einsatzdauer soll ein Prototyp schnell verfügbar und preisgünstig sein. Der Prototyp besitzt einen hohen Abstraktionsgrad und wird nur zur Darstellung von erwünschten Eigenschaften des späteren industriellen Serienproduktes erstellt, dazu kann er mit einfacher bearbeitbaren bzw. kostengünstigeren Modellmaterialien hergestellt werden.

Zum ursprünglichen Zweck der schnellen Herstellung von Prototypen und Modellen wurde das erste Generative Verfahren, die Stereolithografie, 1987 auf den Markt gebracht. Nach ihren Einsatzzwecken werden die Prototypen und Modelle in der VDI-Richtlinie 3404

**Abb. 3.41** Generativ gefertigtes transparentes Stereolithografie-Gehäuse für die DeWalt® Bohrmaschine von Black and Decker® (Homepage der Alphaform AG 2010)



(N.N. 2007) generell in Konzeptmodelle, Design-, Geometrie- und Funktionsprototypen untergliedert. Dabei werden angepasste Generative Verfahren ausgewählt, um die jeweiligen Anforderungen zu erfüllen. Nachfolgend werden einige praktische industrielle Beispiele gezeigt, anhand derer hauptsächlich die von generativen Verfahren gebrachten Vorteile dargestellt werden.

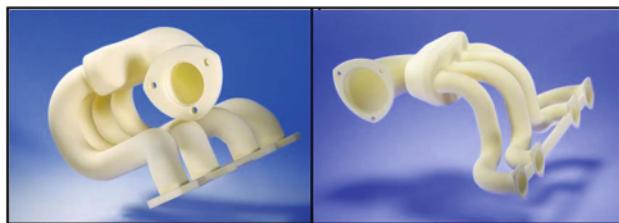
**Beispiel: Optisch klare Prototypen einer Bohrmaschine** Das Unternehmen Design Prototyping Technologies hat die optisch klaren Prototypen für die DeWalt® Bohrmaschine von Black and Decker® hergestellt (s. Abb. 3.41). Dabei wurde die Anforderung gestellt, dass das Innere des Werkzeuges veranschaulicht werden sollte, um Funktionseigenschaften zu untersuchen. Daher wurde ein transparentes Gehäuse benötigt. Darüber hinaus sollten die mechanischen Eigenschaften des Gehäuses an den Arbeitszustand einer Bohrmaschine angepasst sein.

In der Vergangenheit wurden solche optisch klaren Gehäuse aus Polykarbonat mittels Spritzguss abgeformt. Der Nachteil des Spritzguss-Verfahrens liegt darin, dass der Designprozess in dieser Projektphase fast abgeschlossen ist und die Möglichkeit der Abänderung beschränkt bleibt. In diesem Fall wurde das transparente Gehäuse durch SLA-Verfahren angefertigt. Als Material wurde DSM Somos® 10120 WaterClear™ bzw. ein außergewöhnliches SLA-Harz ausgewählt. Dieses SLA-Harz ist optisch ebenso klar wie Polykarbonat und mit guter Härte, Robustheit und Kerbschlagzähigkeit werden die an den Prototypen gestellten Anforderungen erfüllt.

Dank des schnellen SLA-Verfahrens (Abschn. 3.4.5.1) und des gewählten SLA-Harzes konnten die Prototypen zu einem frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses gefertigt werden. Durch diese Zeitsparnis kann der spätere Produktgewinn verbessert werden. Da die SLA-Verfahren direkt auf 3D-Daten basieren, waren Änderungen derselben Konstruktion oder Varianten-Konstruktion mühelos realisierbar (Homepage der Alphaform AG 2010).

**Beispiel: Ansaugkrümmer eines Verbrennungsmotors** Die Automobilbranche ist einer der wichtigsten Einsatzbereiche von Generativen Verfahren. Beim Automobilbau spielen die technischen und funktionellen Prüfungen oder Untersuchungen mit entsprechenden Prototypen eine bedeutende Rolle. Diese Prototypen werden oftmals individuell, nur einzeln

**Abb. 3.42** Funktionsprototyp des Ansaugkrümmers eines Vierzylindermotors (Homepage der CP-Centrum für Prototypenbau GmbH, Deutschland 2010)



oder in kleiner Stückzahl, manchmal aber mit hohen Serienprodukt-ähnlichen Anforderungen benötigt. Bisher wurde die Herstellung von diesen Prototypen von vielen Faktoren wie Kosten, erreichbare Komplexität der Geometrie, Lieferzeit usw. eingeschränkt. Heute werden die früher gegebenen Probleme der Prototypen-Herstellung durch den Einsatz von Generativen Verfahren gelöst.

Als das Herz eines Autos muss der Verbrennungsmotor vor dem endgültigen Gebrauch auf einem Motorenprüfstand vollständig geprüft werden, um alle Aspekte der Motorencharakteristik sicherzustellen. Dazwischen wird die Überprüfung der Luftströmungsverhältnisse im Ansaugkrümmer mit der virtuellen Simulation nicht erreicht, sondern muss praktisch am Prüfstand ausgeführt werden. Dafür werden Prototypen von Ansaugkrümmern in kleiner Stückzahl für den Test benötigt. Weil die Prüfungsbedingungen nach dem tatsächlichen Gebrauchsstand des Motors festgelegt werden, sind für die verwendeten Prototypen von Ansaugkrümmern bestimmte mechanische und thermische Belastbarkeiten gefordert. Durch eine konventionelle Fertigung könnten diese Prototypen als Spritzgussteile hergestellt werden. Dafür ist ein kostenintensives Werkzeug unvermeidbar, welches in einem langwierigen Fertigungsprozess hergestellt werden muss.

Dank des Einsatzes von Kunststoff-Lasersintern (Abschn. 3.4.5.2) steht bereits nach sehr kurzer Zeit ein Funktionsprototyp des Ansaugkrümmers eines Vierzylindermotors zur Verfügung (s. Abb. 3.42). Die spätere mögliche Änderung der Geometrie ist nicht mehr problematisch. Dadurch kann eine Optimierungskonzeption bei der Entwicklung des Ansaugkrümmers schnell und preiswert erfolgen. Die in Abb. 3.42 dargestellten Prototypenvarianten des Ansaugkrümmers von Vierzylindermotoren bestehen aus glasgefülltem Polyamid. Heute werden begleitend generative Materialien besondere für verschiedene konkrete Bedürfnisse weiterentwickelt. In diesem Fall wäre ebenso ein FLM-Teil (Abschn. 3.4.5.4) aus ABS-Kunststoff geeignet (Gebhardt 2007).

Abbildung 3.43 stellt einen Ansaugkrümmer eines Lotus-Rennwagens dar, der von der Firma Evonik gesponsert wurde. Die virtuelle 3D-Konstruktion zeigt eine Geometrie mit einem dreidimensional gekrümmten, elliptischen Rohr, das durch konventionelle Fertigungsverfahren sehr schwer oder kaum herstellbar ist. Mit der Lasersinter-Technologie jedoch wurde dieser Ansaugkrümmer aus Polyamid-12-Pulver mühelos produziert. Mit einem geeigneten SLS-Material kann der Ansaugkrümmer als Endprodukt durch SLS-Verfahren günstig hergestellt werden, was auch als sog. *Rapid Manufacturing* bezeichnet wird.

Neben den Kunststoff-Ansaugkrümmern ist die Integration von Generativen Verfahren in die Feingussprozesskette für die Herstellung von metallischen Ansaugkrümmern

**Abb. 3.43** Ansaugkrümmer des Lotus-Rennwagens: CAD-Modell (*unten*) und Prototyp (*oben*) (Homepage der Evonik Industries AG, Deutschland 2010)



**Abb. 3.44** Lasergesintertes Modell einer Ansaugkrümmer-Hälfte (*links*) und Aluminium-Serienteil (*rechts*) des Lotus-Rennwagens (Homepage der CP-Centrum für Prototypenbau GmbH, Deutschland 2010)



in Kleinserien sinnvoll. Nach der Fertigstellung der Arbeit am Rechner wird zunächst ein verlorenes Modell aus wachsinfiltriertem Polystyrol (s. Abb. 3.44 *links*) durch Lasersintern erstellt. Auf Basis dieses Modells wird das Serienteil aus Aluminium (s. Abb. 3.44 *rechts*) durch Feinguss abgegossen.

**Bspiele: Prototypenbau durch SLA-Vakuumguss-Prozesskette** Ein typischer indirekter Prototypen- bzw. Modellbau für Kunststoffteile ist die neue generative Prozesskette für Vakuumguss (Abschn. 3.4.6.1). Im Beispiel wird der Schwerpunkt hauptsächlich auf die Verwendungen der SLA-Vakuumguss-Prozesskette gelegt. In dem Projekt für die Firma Harman/Becker wurden 20 vollfunktionsfähige Prototypen für das Bedienteil des Audi A6 und danach weitere 80 Stück für die Bemusterung von einem Prototypen-Dienstleister, der Firma Promod, angeboten.

Die 3D-Konstruktion der Blende wurde von der Kundenseite als 3D-CAD-Modell geliefert und mittels Stereolithografie-Verfahren aus Epoxydharz aufgebaut (s. Abb. 3.45). Nach sorgfältiger Nachbearbeitung der Oberflächen der einzelnen Kunststoffkomponenten wurden die entsprechenden Silikonformen für den anschließenden Vakuumguss abgegossen. Um einen realistischen Eindruck zu erzielen, wurden für die Beleuchtung der Schalter SoftCoat Lacke genutzt und Laserbeschriftungen vorgenommen. Gummidichtungen wurden ebenfalls im Vakuumgussverfahren hergestellt. Aluminiumteile (Drehschalter) wurden gedreht und NC gefräst (vgl. Homepage der promod<sup>TM</sup> GmbH, Deutschland 2010).

**Abb. 3.45** Prototyp der Blende Audi A6 (Homepage der promod™ GmbH, Deutschland 2010)



Weitere Beispiele über die durch diese Prozesskette hergestellten Erzeugnisse werden in Abb. 3.46 gezeigt.

### 3.4.7.2 Rapid Tooling

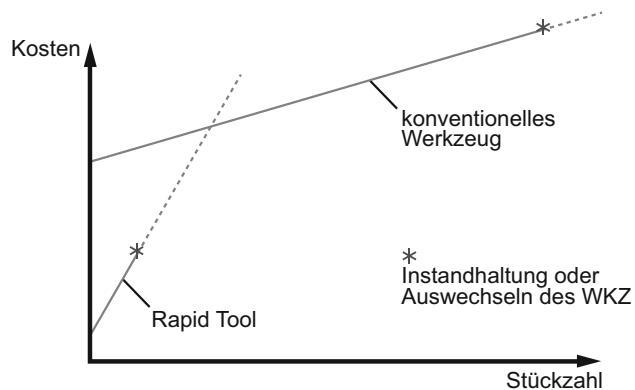
Unter Rapid Tooling versteht man die Erstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen mittels der Generativen Verfahren in einer möglichst kurzen Zeit. Abbildung 3.47 veranschaulicht allgemein das Verhältnis von benötigter Stückzahl und Gesamtkosten beim Einsatz von Rapid Tooling gegenüber konventioneller Werkzeugherrstellung. Daraus kann man schließen, dass die verschiedenen Rapid Tooling Verfahren viel günstiger zur Herstellung der Klein- und Vorserien neuer Produkte oder als eine wirtschaftliche Alternative zur teuren Fertigung mit kleiner Stückzahl eingesetzt werden können. Je nach der benötigten Stückzahl und den gewünschten Eigenschaften des herzustellenden Bauteils wird die dafür geeignete Tooling Methode ausgewählt.

**Indirektes Rapid Tooling Verfahren für Kunststoffbauteile** Beim indirekten Rapid Tooling Verfahren handelt es sich um die Erstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen durch Folge- bzw. Abformverfahren mittels generativ hergestellter Urmodelle. Mit dem



**Abb. 3.46** Prototypen aus PU-Gießharz durch Stereolithografie-Vakuumguss-Prozesskette: Lautsprechergitter; Frontschürze; Eierkocher; Elektronikgehäuse (Homepage der CP-Centrum für Prototypenbau GmbH, Deutschland 2010)

**Abb. 3.47** Kosten-Vergleich über Stückzahl beim Einsatz von Rapid Tooling gegenüber konventioneller Werkzeugherstellung (WKZ – Werkzeug) (Turan 2002)

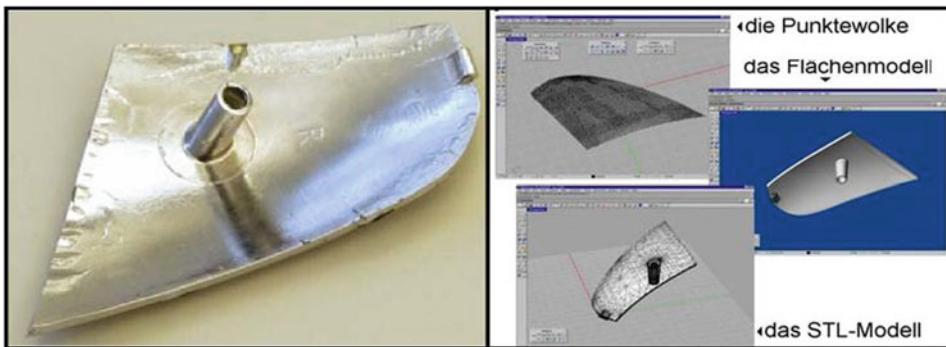


in Abschn. 3.4.6.1 vorgestellten Vakuumgießen wird der Herstellungsvorgang der relativ weichen Silikonformen mit einem generativ hergestellten Urmodell beschrieben, was ein typisches Beispiel für indirektes Rapid Tooling ist. Die auf diese Weise erzeugten Werkzeuge sind als Kunststoff-Prototypen bzw. Kunststoff-Bauteile in Kleinserie sinnvoll. Einige praktische Beispiele wurden ebenso bereits in Abschn. 3.4.7.1 unter Rapid Prototyping angegeben.

Ein weiteres Beispiel ist das mit generativ herstellten Urmodellen arbeitende Spin-Casting zum Abguss der Bauteile aus Duroplasten und sogar hochfesten Zinklegierungen (ZAMAK-Legierung von Zink, Aluminium, Magnesium, Kupfer). Das Spin-Casting ist eigentlich eine Variante des Schleudergussverfahrens, bei dem Kautschuk oder ein kautschukähnliches Material für die Formen verwendet wird. Nach dem kompletten Einbetten der Urmodelle in die Kautschukmasse erfolgt das Vulkanisieren der Kautschukform. Anschließend werden die Urmodelle entfernt und das Werkstückmaterial wird der rotierenden Form zugeführt. Durch den Druckeffekt der Zentrifugalkraft wird eine komplett Befüllung der Kavitäten inklusive der Detailbereiche gewährleistet (nach Gebhardt 2007; Zäh 2006). Gegenüber der geringen Standzeit (ca. 10–20 Stück) der weichen Abgussformen lassen sich auch die Formeinsätze mit größerer Standzeit (mehrere zehntausend Stück (Gebhardt 2007)) nach dem gleichen Prinzip hart abgießen. Dazu kommen heute die Gießharzwerkzeuge als typischer Anwendungsfall zum Einsatz. Nachfolgend wird ein konkreter generativer Herstellungsvorgang eines Spritzgusswerkzeuges erläutert.

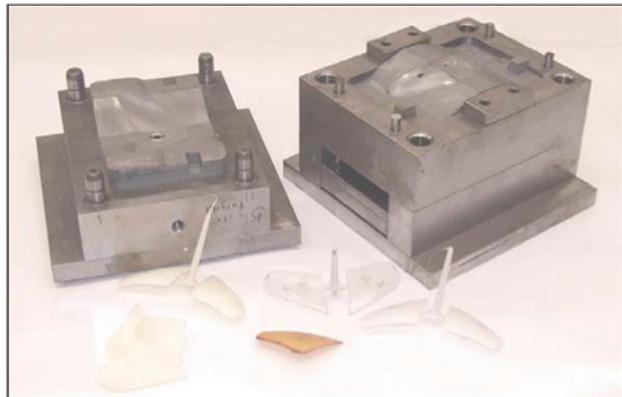
Für die in Abb. 3.48 gezeigte Anwendung wurden 200 Sätze der linken und rechten Türgriffblende von BMW 2002 durch Spritzguss gefertigt und anschließend verchromt. Da in diesem Fall keine 3D-Daten zur Verfügung standen, wurde als Datenvorbereitung die Türgriffblende mittels Laserscanner kopiert, d. h. eine sog. Punktwolke erzeugt und anschließend in geeigneter Software zu einem Flächenmodell und dem nötigen STL-File aufbereitet.

Das generativ gefertigte Urmodell wurde in eine Plastilinmasse in einem Rahmen eingebettet und mit Kühlkanal versehen. Anschließend wurde die Mischung aus Aluminiumpulver und Gießharz mit einem geeigneten Härter in den Rahmen eingegossen. Die so gefertigten Formhälften (s. Abb. 3.49) wurden anschließend in der Serienfertigung ein-



**Abb. 3.48** Türgriffblende (*links*) und 3D-Datenvorbreitungsprozess (*rechts*) (Reinhart et al. 2010)

**Abb. 3.49** Formeinsätze und gespritzte Türgriffblende (vorn in der Abbildung) (Reinhart et al. 2010)



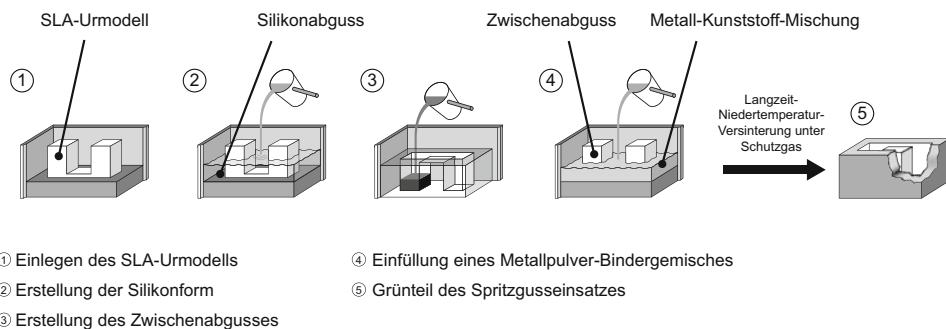
gesetzt. Nach dem Einspritzen von 200 Sätzen wies das Werkzeug kaum Gebrauchsspuren auf. Die Oberflächenqualität der Teile war laut Hersteller nahezu identisch verglichen mit denen aus einem reinen Aluminium-Werkzeug (Reinhart et al. 2010).

Bei diesem neuartigen Werkzeugbau aus aluminiumgefülltem Gießharz können manche komplexe Hinterschnitte, die durch konventionelles Fräsen des Aluminiumblocks schwer oder nur sehr aufwändig herstellbar sind, problemlos und wirtschaftlich gefertigt werden. Andere ähnliche Beispiele für den generativen Werkzeugbau aus aluminiumgefülltem Gießharz der CP GmbH werden in Abb. 3.50 dargestellt.

Eine andere indirekte Erzeugung der Spritzgusswerkzeugeinsätzen mit höherer Standzeit durch Abformung von generativen Urmodellen ist der 1970 in den USA entwickelte Keltool-/Course4 Technology Prozess. Dieser Prozess bezeichnet eine Sintertechnologie zur Fertigung von Spritzgussformeinsätzen. Die generativ gefertigten Modelle werden in diesem Verfahren sowohl als Negativteil (Kavität) als auch als Positivteil (Bauteil) (s. Abb. 3.51) eingesetzt.



**Abb. 3.50** Gehäuse eines Plasmuschneidegerätes (*links*): Spritzgussteil aus Polyamid 6 GF 30 (3) mit den in einen Stahlrahmen (2a) eingebetteten Gießharzwerkzeughälften aus aluminiumgefülltem Epoxydharz (2b); zweiteiliger Filterhalter (*rechts*): Spritzgussteil aus Polyamid 6 GF 30 (3), Stereolithografie-Urmodelle aus Epoxydharz (1), Gießharzwerkzeughälften aus aluminiumgefülltem Epoxydharz (2a) (Reinhart et al. 2010)

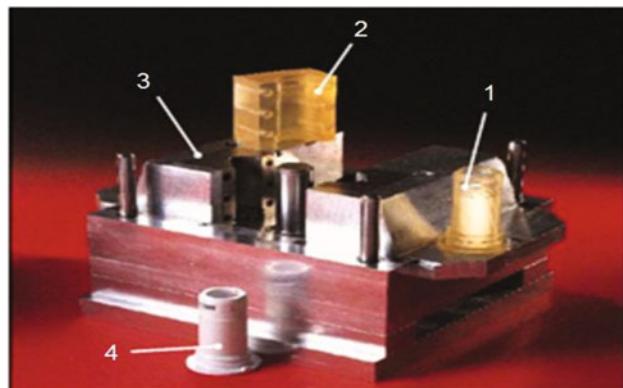


**Abb. 3.51** Arbeitsprinzip des Keltool-Prozesses mit positivem Urmodell (Bauteil) (nach Gebhardt 2007; Reinhart et al. 2010)

Aus einem negativen Urmodell des Spritzwerkzeugeinsatzes wird ein positiver Abdruck in Silikon erzeugt. Dann wird diese Silikonform mit der Formmassemischung von Metallpulver (z. B. Werkzeugstahl) und Bindemittel abgegossen. Dieses Gemisch mit einer variablen Korngröße von 1 bis 20 mm wird bei ca. 100 °C ausgehärtet. Der dadurch entstandene Grünling wird nach Entfernung der Form weiter in einem Ofen mit oder ohne Druck versintert, dabei wird das Bindemittel ausgetrieben und anschließend der Formeinsatz mit Kupfer infiltriert. Das fertige Bauteil besteht zu 70 % aus A6-Werkzeugstahl und zu 30 % aus Kupfer (nach Gebhardt 2007; Reinhart et al. 2010).

Beim Einsatz von generativ gefertigten Modellen (z. B. durch Stereolithografie) als ein positives Urmodell des Bauteiles laufen die identischen Arbeitsschritte wie beim negativen Urmodell ab (s. Abb. 3.51). Zum Vergleich sind in Abb. 3.52 anhand eines Beispiels die unterschiedlichen Modelle bzw. Formeinsätze dargestellt.

**Abb. 3.52** Keltool-Formeinsatz (nach Homepage der 3D Systems GmbH 2010)



Mit dem Keltool-Verfahren hergestellte Formeinsätze sind hochfest und haben eine Standzeit von mehreren Millionen Stück von Kunststoffteilen. Deshalb wird die Keltool Technologie für die Herstellung von Serienwerkzeugen verwendet. Die Vorteile solcher Formeinsätze liegen hauptsächlich in der besseren Oberflächengüte des Endproduktes und der Darstellbarkeit von feinen Details. In den letzten 10 Jahren konnte sich diese Technologie industriell nicht weit verbreiten.

**Indirektes Rapid Tooling Verfahren für Metallbauteile** Der Feinguss ist eines der wichtigsten indirekten Verfahren für Metallbauteile (vgl. Abschn. 3.4.6.2). Im günstigsten Fall können die im Sandguss verwendeten Dauermodelle durch generative Verfahren hergestellt werden, und man erhält angepasste Sandformhälften.

**Direktes Rapid Tooling Verfahren für Kunststoff- und Metallbauteile** Da die direkte Herstellung von Werkzeugen aus Kunststoff in der Praxis von geringer Bedeutung ist, wird nachfolgend die direkte generative Erzeugung von Metall-, Sand- und sogar Keramikwerkzeugen, vorzugsweise durch Lasersinter- und Strahlschmelz-Verfahren, beschrieben.

In Verbindung mit dem Begriff *Direktes Rapid Tooling*, d. h. Aufbau von Werkzeugkomponenten mittels generativer Verfahren, wurde die Möglichkeit des konturbezogenen Temperierens *Conformal Cooling* zur industriellen Anwendungsreife entwickelt. Im Gegensatz zu den geradlinigen, gebohrten Kühlkanälen im traditionellen Spritzguss-Werkzeugbau, wurden mit den konturbezogenen Temperierkanälen bedeutende Effekte bezüglich Produktivität (Zykluszeitverkürzung), Qualität (Verzugsreduzierung) und Prozesszuverlässigkeit ermöglicht.

Der Begriff *Indirektes Metall Lasersintern* (IMLS) wurde von 3D-Systems eingeführt. Obwohl die Firma heute nicht mehr diese Bezeichnung benutzt, beruht ihr aktueller Metallbearbeitungsprozess noch auf der Basis des IMLS-Arbeitsprinzips. Der IMLS-Prozess ist zweistufig: Im ersten Schritt wird ein pulverbörmiges Gemisch von Polymerbinder und Metallpulver z. B. mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>-Lasers zu einem Grünling versintert. Anschließend wird der dadurch entstandene Grünling mit dem Binderaustreiben, dem Nachversintern

<p><b>Spritzgießwerkzeug Gehäusefuß</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indirektes Metall-Lasersintern</li> <li>- CNC-Fräsen</li> <li>- 240 Bauteile (PC-ABS) ohne Verschleiß</li> <li>- Herstelldauer inkl. Konstruktion 3 Wochen</li> </ul> 	<p><b>Druckgießwerkzeug Magnesium</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indirektes Metall-Lasersintern der Teilekontur</li> <li>- CNC-Fräsen der Angußgeometrie</li> <li>- 420 Bauteile (AZ91) ohne Verschleiß der Kontur</li> <li>- bis 1000 Teile realisierbar</li> </ul> 
<p><b>Druckgießwerkzeug Aluminium</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indirektes Metall-Lasersintern der Teilekontur</li> <li>- CNC-Fräsen der Angußgeometrie</li> <li>- 310 Bauteile (AISI9Cu3) leichte Wärmerisse ab Teil 50</li> <li>- bis 500 Teile realisierbar</li> </ul> 	<p><b>Vacuradruckgießwerkzeug Aluminium Bauteil Griffleiste</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indirektes Metall-Lasersintern der inneren Teilekontur</li> <li>- CNC-Fräsen der Außenkontur und Angußgeometrie</li> <li>- 700 i.O. Bauteile hergestellt</li> </ul> 

**Abb. 3.53** Im direkten Metallsinter-Prozess erstellten Formeinsätze (Breitinger und Pieverling 2010)

und der Infiltration mit Kupfer oder Polymeren weiter bearbeitet. Die wegen der Aufheiz- und Abkühlungsvorgänge entstandenen möglichen Verzüge und internen Spannungen werden durch den Einsatz des gleichmäßigen und relativ langsamen Ofenprozesses verringert (nach Gebhardt 2007). Die durch IMLS-Verfahren hergestellten Werkzeugeinsätze eignen sich für die Vorserie und Kleinserie. Nicht nur Spritzgusswerkzeuge für serienidentische Kunststoffteile sondern auch die Druckgusswerkzeuge für verschiedene Metalle (z. B. Magnesium, Aluminium) können mit diesem Verfahren hergestellt werden. In Abb. 3.53 sind Beispiele mit deren jeweiliger Haltbarkeit aufgezeigt.

Der Grünling kann auch durch 3D-Drucken (Abschn. 3.4.5.5) von mit Bindemittel gemischten Metallpulvern erstellt werden. Bei der Gestaltung der Teilekonstruktion muss besonders die Möglichkeit der späteren Entfernung der Stützen bzw. des restlichen Pulvers in internen Hohlräumen bedacht werden. Ähnlich wie beim IMLS werden die Kunststoffbinder ausgetrieben. Nach dem Versintern der verbleibenden Metallpartikel im Ofen entsteht ein poröses Bauteil, das nach Infiltrierung mit Bronze in flüssiger Phase (hundertprozentige relative Dichte: 60 % Stahl und 40 % Bronze) als Formensatz für das Druck- und Spritzgießen einsatzfähig verwendbar ist.

Die Entwicklung der Strahlschmelz-Technologien (Abschn. 3.4.5.3) in dem Anwendungsbereich *Direktes Rapid Tooling* ist heute und auch in Zukunft von großer Bedeutung. Wie bereits erwähnt, werden für diese Verfahren von verschiedenen Unternehmen jeweils eigene, spezifische Bezeichnungen genutzt, z. B. *Direct Metal Laser Sintering* der EOS GmbH, *Selective Laser Melting* der MTT Technologies Group (seit 2010 SLM Solutions



**Abb. 3.54** Im direkten Verfahren hergestellte Spritzgusswerkzeugeinsätze (nach Homepage der EOS GmbH 2010)

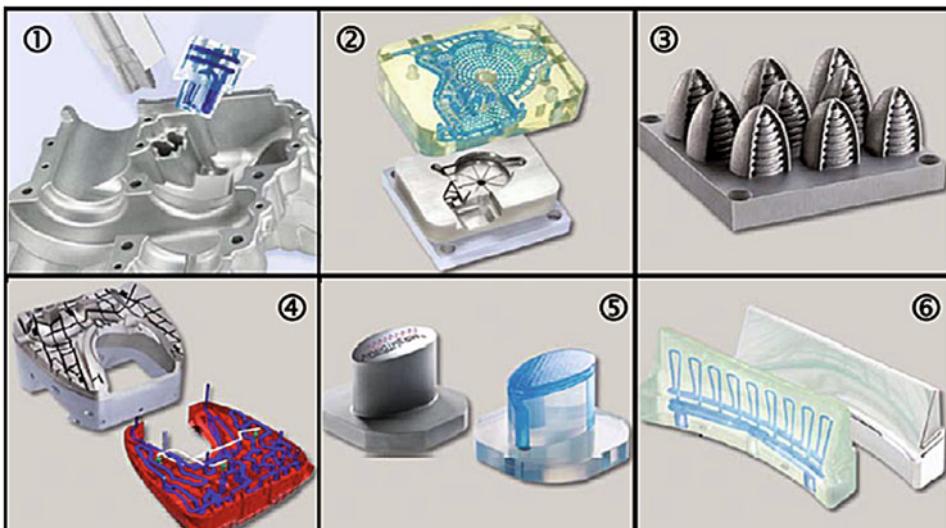
GmbH) und *Laser Cusing* von der Firma Concept Laser. Abbildung 3.54 enthält einige praktische Anwendungen der Firma EOS.

Die Entwicklungen im Bereich des direkten Werkzeugbaus für den Spritzguss von Kunststoffteilen und für den Druckguss von Metallteilen sind besonders in den letzten Jahren erheblich vorangeschritten. Die in Abb. 3.55 aufgezeigten Beispiele ergänzen die Darstellung realisierter Teile.

Ein wirtschaftlicher Einsatz der Strahlschmelz-Verfahren ist auch mit der sog. *Hybridbauweise* möglich, einer Kombination aus konventionell vorgefertigten, als Bauplattform dienenden Basiswerkstücken und generativ aufgetragenen Funktionsgeometrien (s. Abb. 3.56). Dabei sollte das Volumen der Funktionsgeometrie möglichst gering gehalten werden (Kolbe 2010).

Neben dem neuen Werkzeugbau kann diese Hybridbauweise auch zur Reparatur oder Änderung der bestehenden Werkzeugeinsätze genutzt werden. In dem in Abb. 3.57 gezeigten Beispiel wurde ein teilweise beschädigter Werkzeugeinsatz durch das Direct Metal Laser Sintering der EOS GmbH generativ repariert. Nachdem die Bezugsebene durch Schärfen bzw. Schleifen bestimmt wurde, werden die fehlenden Teile auf der Vorform generativ aufgebaut. Damit werden Durchlaufzeiten und Kosten gegenüber einem neuen Bauprozess deutlich verringert.

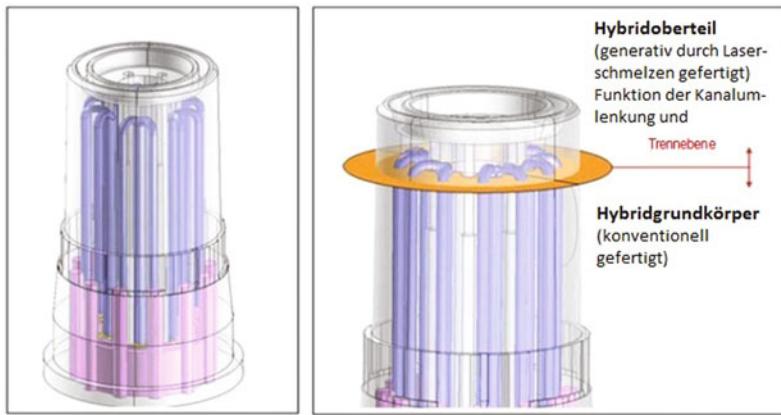
**Direktes Rapid Tooling aus Formsand für Metallbauteile** Eine andere Einsatzmöglichkeit von generativer Technologie im Werkzeugbau ist die direkte Herstellung der



Nr.	Beschreibung	Material	Merkmale
1	Werkzeugeinsatz mit konturnaher Kühlung im Bereich Aluminiumdruckguss von Getriebegehäusen	Warmarbeitsstahl	Größe: 55 x 40 x 66 mm
2	Werkzeugeinsatz mit konturnaher Flächenkühlung zur Reduzierung der Zykluszeit im Serienwerkzeug	Warmarbeitsstahl	Größe: 100 x 135 x 47 mm
3	Werkzeugeinsatz mit konturnaher Spiralkühlung	Rostfreier Warmarbeitsstahl	Größe: Ø 25 x 35 mm Härte 48 HRC
4	Werkzeugeinsatz für Staubsaugerdeckel mit konturnahen Kühlkanälen	Warmarbeitsstahl	Größe: 200 x 220 x 170 mm
5	Werkzeugeinsatz mit konturangepasster Flächenkühlung	Warmarbeitsstahl	Größe: 95 x 25 x 54 mm
6	Werkzeugeinsatz für Staubsaugerdeckel mit konturangepasster Parallelkühlung	Warmarbeitsstahl	Größe: 56 x 28 x 51 mm

**Abb. 3.55** Mit Strahlschmelzen erstellte Formeinsätze (Homepage der Concept Laser, Deutschland 2010)

Sandformen und Sandformkernpakete für Metall-Sandguss (Abschn. 3.4.6.2), was zu einer drastischen Verkürzung der Fertigungszeit führt. Auf dem deutschen Markt bietet die EOS GmbH mit dem Formsand-Lasersintern und die Firma Prometal RCT auf Basis des 3D-Druckens Verfahren an, mit denen Sandformen und Kerne unmittelbar schichtweise gebaut werden können. Für die Fertigung des in Abb. 3.58 (oben) dargestellten Ansaugkrümmers wurde vom Entwurf der Sandformen und Kerne bis zum richtigen Gussteil insgesamt lediglich 5 Tage benötigt. Der Zylinderkopf des Rasenmähers (s. Abb. 3.58 (unten)) war nach der Freigabe der 3D-CAD-Daten in nur 3 Tagen lieferbar (Homepage der ProMetal RCT, Deutschland 2010).



**Abb. 3.56** Hybridbauweise: Kombination von konventionell gefertigten Grundkörpern und durch Strahlschmelzen ergänzte Formteile (nach Kolbe 2010)



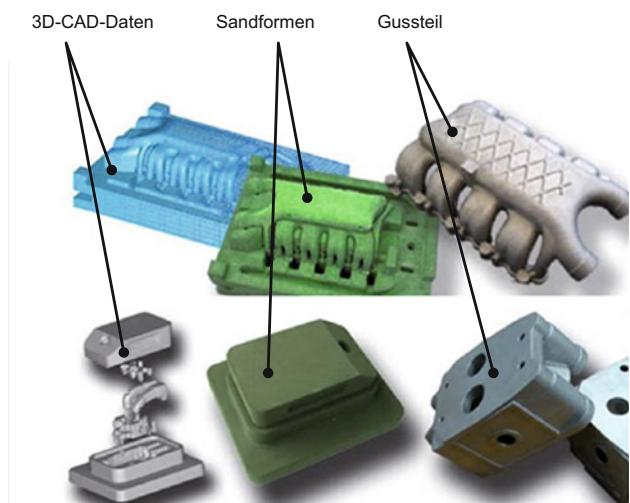
**Abb. 3.57** Strahlschmelzen (Hybridbauweise) zur Reparatur des teilbeschädigten Werkzeugeinsatzes (Homepage der EOS GmbH 2010)

### 3.4.7.3 Rapid Manufacturing

Unter *Rapid Manufacturing* versteht man die schnelle Fertigung von Endprodukten, wobei hier der Begriff lediglich in Verknüpfung mit den Generativen Verfahren diskutiert wird. Obwohl die generativen Technologien mit ihren erheblichen Vorteilen derzeit noch primär im Prototypenbau eingesetzt werden, ist das Entwicklungsinteresse zunehmend auf die unmittelbare Fertigung von Endprodukten mit generativen Anlagen gerichtet. In der Fachliteratur werden noch verschiedene Bezeichnungen, wie z. B. *E-Manufacturing*, *Digital Manufacturing*, *Desktop Manufacturing*, *Solid Freeform Manufacturing* usw. verwendet. Alle Begriffe sind auf den gleichen Grundsatz bezogen, nämlich die schnelle Produktion direkt aus elektronischen Daten.

Verallgemeinert können diese Endprodukte einsatzfähige Bauteile oder Werkzeuge sein. Deshalb gehört die direkte schnelle Herstellung von Serienwerkzeugen, das sog. *Rapid Tooling*, zum *Rapid Manufacturing*. Da bereits unter Abschn. 3.4.7.2 der generative Werkzeugbau anhand praktischer Anwendungsbeispiele detailliert dargestellt wurde, soll

**Abb. 3.58** Ansaugkrümmer (oben) und Zylinderkopf (unten) mit direkter Herstellung von Sandformen (nach Homepage der ProMetal RCT, Deutschland 2010)



**Abb. 3.59** Generativ gefertigte Bauteile als Endprodukte:  
Waschmotor (links);  
Blutzentrifuge für die  
Medizintechnik (rechts)  
(Homepage der EOS GmbH  
2010)



hier lediglich auf ausgewählte Anwendungen für die direkte Herstellung von serienidentischen Produkten im Industriebereich eingegangen werden. Neben der Einsparung von Kosten und Zeitaufwand bei Einzelteilstellung und Kleinserien ist diese innovative Fertigungsmethode besonders für die individuelle Herstellung nach Kundenwünschen geeignet.

**Endprodukte aus Kunststoff** Durch selektives Lasersintern (Abschn. 3.4.5.2) können in kurzer Zeit voll funktionsfähige Kunststoffbauteile gebaut werden, die serienidentische mechanische Eigenschaften und Langzeitstabilität besitzen, von der Firma EOS als *DirectPart* bezeichnet. Dafür werden derzeit hauptsächlich verschiedene polyamidbasierte Werkstoffe eingesetzt. Mit guter Oberflächenqualität und Genauigkeit eignen sich diese nicht nur als Funktionsprototypen, sondern auch zum Einsatz als Endprodukte (s. Abb. 3.59).

Als eine weitere vorteilhafte Anwendung können auch dauerhaft bewegliche Teile bzw. Baugruppen integriert und einstufig generativ gefertigt werden. Die Elemente des in Abb. 3.60 (links) gezeigten Karabiners werden aus Polyamid (Basismaterial PA2200) in einem Arbeitsgang im Lasersinter-Verfahren von der EOS GmbH generativ angefertigt. Diese filigranen Bauteile können um die x- und y-Achse gedreht werden. Der funktions-

**Abb. 3.60** Generativ gefertigte Endprodukte:  
Sicherheitsbauteil (*links*);  
Kabelbefestigung (*rechts*)  
(Homepage der Hördler rapid engineering-Prototypenbau, Deutschland 2010; Homepage der Hasenauer & Hesser GmbH, Deutschland 2010)



fähige Federmechanismus wird durch eine im gleichen Bauprozess mitgefertigte Druckfeder realisiert. Typisch sind ebenso nach Kundenwunsch individuell angepasste Kabelbefestigungen mit Schnappverriegelung, die in einem Arbeitsschritt gefertigt werden können (s. Abb. 3.60 (*rechts*)). Traditionell werden die Komponenten derartiger Kabelbefestigungen getrennt vorgefertigt, gefolgt von einer Endmontage.

Darüber hinaus ist die Fertigung von Filmscharnieren möglich, die ein mehrfaches Bewegen ohne Gefahr des Brechens ermöglicht. Abbildung 3.61 zeigt eine durch Lasersintern gefertigte Eierschachtel, für die eine ca. 50-malige Wechselbelastbarkeit besteht.

Die aus drei Gehäuseteilen bestehende Baugruppe in Abb. 3.62 wurde einstufig mit dem Stereolithografie-Verfahren hergestellt und anschließend mit Metalcoating behandelt. Es können somit Werkzeugkosten eingespart und nachträglicher Montageaufwand vermieden werden, da die Werkstücke im Einbauzustand herstellbar werden.

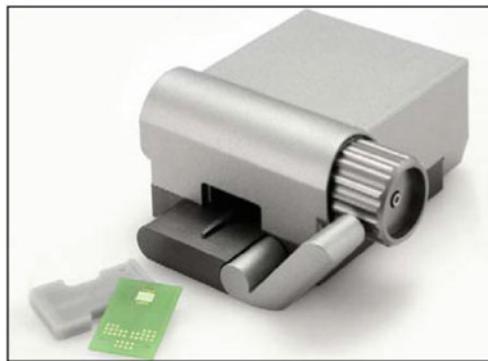
Trotz zahlreicher Beispiele für ihre erfolgreiche Anwendung hat sich die generative Fertigung von Kunststoff-Endprodukten wegen der bestehenden Limitierung der Werkstoffauswahl noch nicht durchgängig durchgesetzt und ist bislang nur für spezifische Bedürfnisse einsetzbar, z. B. für Einzelteile, in relativ kleinen Stückzahlen oder für Bauteile mit sehr komplexer Geometrie. Das Generieren komplexerer Baugruppen kann deshalb derzeit noch nicht als die Alternative von Spritzguss für die Massenfertigung im Industriebereich angesehen werden.

**Endprodukte aus Metall** Seit einigen Jahren haben die Lasersinter- bzw. Strahlschmelzanlagenanbieter ihr Interesse zunehmend auf die direkte Herstellung von verschiedenen



**Abb. 3.61** Generativ gefertigtes Endprodukt: Eierschachtel mit Filmscharnier (Homepage der Weber-KP GmbH, Deutschland 2010)

**Abb. 3.62** Generativ gefertigtes Auslesegerät für elektrische Biochips  
(Homepage der Alphaform AG 2010)



**Abb. 3.63** Generativ gefertigte Endprodukte:  
Kraftstoffeinspritzdüse in  
Gasturbinen, Material:  
CobaltChrome MP1 (*links*);  
Turbinenrad, Material:  
NickelAlloy IN718 (*rechts*)  
(Homepage der EOS GmbH 2010)



metallischen Teilen gerichtet. Heute werden bereits metallische Endprodukte in Stahl und Leichtmetall-Legierungen (z. B. Edelstähle, Titan- und CoCr-Legierung, Aluminium etc.) für Funktionsteile in der Medizintechnik, dem Rennsport, der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Zu den typischen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt zählen Triebwerks- und Turbinenteile sowie Bauteile für die Innenausstattung der Kabinen. Dabei liegt der Vorteil der generativen Technologien darin, dass die funktionsfähigen Bauteile mit hochkomplexen Geometrien und aerodynamischen Eigenschaften innerhalb kürzester Zeit und zu niedrigen Kosten verfügbar sind. Gleichzeitig kann man generativ verfahrensbedingte spezifische Strukturen konstruieren, um Material und Gewicht einzusparen (s. Abb. 3.63).

Die komplexen Strukturen der Bauteile sind mit herkömmlichen Fertigungsverfahren fast nicht oder nur sehr aufwändig realisierbar, mit den innovativen Technologien jedoch werden sie nicht nur problemlos, sondern auch wirtschaftlich aufgebaut (s. Abb. 3.64).

Auch die individuelle Fertigung von Implantaten oder dentalen Bauteilen ist ein sehr wichtiges Anwendungsgebiet. Wegen der Themenbegrenzung wird hier jedoch die Anwendung im Medizin- und Kunstbereich nicht weiter betrachtet.

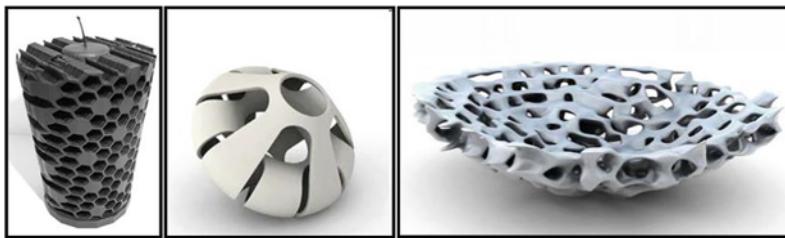


**Abb. 3.64** Generativ gefertigte Endprodukte: Spiralbürste aus CL 20ES (1.4404) (*oben links*); Misch- und Schereinsatz im Heißkanal aus CL 20ES (*oben Mitte*); Ventilblock aus CL 20ES (*oben rechts*); Abgaskrümmer aus CL 31AL (AlSi10Mg) (*unten links*); Turbinenschaufel mit Innenkühlung aus CL 100NB (Inconel 718) (*unten Mitte*); Lösemechanismus für Lenkrad aus CL 30AL Aluminium (AlSi12) (*unten rechts*) (Homepage der Concept Laser, Deutschland [2010](#))

### 3.4.8 Erreichbare Effekte im Vergleich zu traditionellen Fertigungsverfahren

Die Veränderung der Marktbedürfnisse zieht einen steigenden Konkurrenzdruck im Industriebereich nach sich. Einerseits wird eine hohe Variantenvielfalt und eine höhere Flexibilität bezüglich der Stückzahlen gefordert. Andererseits spielen Kosten und Zeit in der Fertigung eine immer größere Rolle. Besonders bei individuellen Einzelteilen und kleinen Stückzahlen weisen die Generativen Technologien einzigartige Möglichkeiten auf, um diese hohen Ansprüche zu erfüllen. Insgesamt können die folgenden vorteilhaften Aspekte beim Einsatz von Generativen Technologien zusammengefasst werden.

**Wirtschaftlicher Modell- und Prototypenbau in der Produktentwicklung** Jedes neue Produkt beginnt mit der Entwurfsphase. Es wird eine gedankliche Konzeptidee zu einem physischen produzierbaren Produkt umgesetzt. Je weiter der Produktentwicklungsgrad vorangeschritten ist, desto teurer sind die Änderungen oder die Korrektur von Designfehlern des Produktes. Den traditionell oftmals handwerklichen Modellbau ablösend, kommen heute bereits die generativen Fertigungsverfahren zur schnellen und flexiblen Herstellung von Modellen bzw. Prototypen zum Einsatz. Damit kann man bereits in der Produktentwicklungsphase diverse serienidentische Produkteigenschaften wie z. B. Visualisierung, Haptik, Geometrie- und Funktionsanpassung, Farbe usw. untersuchen und



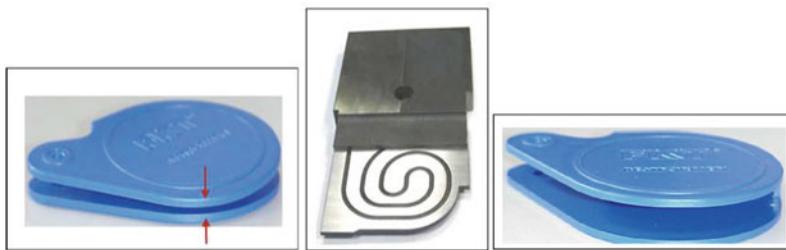
**Abb. 3.65** Generativ gefertigte Teile mit komplexen Geometrien (Homepage 2010a, b; Homepage der BASF Schweiz AG, Schweiz 2010)

daraus wesentliche Informationen gewinnen, um den möglichen späteren Änderungsaufwand zu verringern. Ebenso wird durch das Vorhandensein von physischen Prototypen die Kommunikation im interdisziplinären Team vereinfacht und die gesamte Entwicklung beschleunigt. In diesem Bereich können neben großen Konzernen besonders die kleinen und mittelständischen Unternehmen von Generativen Technologien profitieren.

**Eingesparte Fertigungszeit und -kosten** Weil die Generativen Technologien die Bauteilherstellung direkt aus 3D-CAD-Daten ermöglichen, entfallen einige, für den traditionellen Modellbau notwendige Arbeitsschritte (z. B. Modellbauzeichnungen) generell durch den Einsatz der Generativen Fertigungsverfahren. Ebenso ist bei Designänderungen nicht, wie beim CNC-Fräsen nötig, eine Änderung der CAM-Programmierung erforderlich. Zudem entfällt ein neuer spezifisch an Produkte angepasster Werkzeugbau. Stattdessen können die Änderungen nach Überarbeitung der 3D-CAD-Daten direkt, lediglich nach Konvertierung in das STL-Format, an die Fertigungstechnologien übergeben werden. Neben der Beschleunigung des Änderungsprozesses werden auch die von den entfallenen Arbeitsschritten bedingten Kosten eingespart. Besonders bei kurzen Produktlebenszyklen ist die von Generativen Technologien gegebene Schnelligkeit von großer Bedeutung (nach Zäh 2006).

**Unbegrenzte Konstruktionsfreiheit** Mit den Generativen Fertigungsverfahren können beliebige Geometrien, wie z. B. interne Hohlräume, Hinterschnitte, sogar die durch konventionelle Fertigungsverfahren schwer oder nicht herstellbaren Formen, problemlos ohne aufwändige Werkzeuge realisiert werden. Dadurch können die wachsenden Anforderungen an die Individualisierung und Komplexität sowie an die Gewichtsreduzierung und die damit in vielen Fällen verbundene Energieeinsparung der Produkte erfüllt werden. Die Herstellung der in Abb. 3.65 gezeigten Strukturen ist nur mit Generativen Fertigungsverfahren möglich.

**Optimierter Werkzeugbau für Abgussverfahren** Seit einigen Jahren wird großes Interesse am generativen Werkzeugbau für Abgussverfahren, insbesondere Spritzgussverfahren und metallische Druckgussverfahren gezeigt. Dabei sind gezielt eingebrachte interne Hohlräume zur Temperierung bzw. konturnahen Kühlung als Entwicklungsschwerpunkt



**Abb. 3.66** Temperaturbedingte Verformung einer durch Spritzguss abgegossenen Schutzhülle (*links*) ohne und (*rechts*) mit Konturtemperierung; Schieberseinsatz mit Konturtemperierung (*Mitte*) (Kolbe 2010)

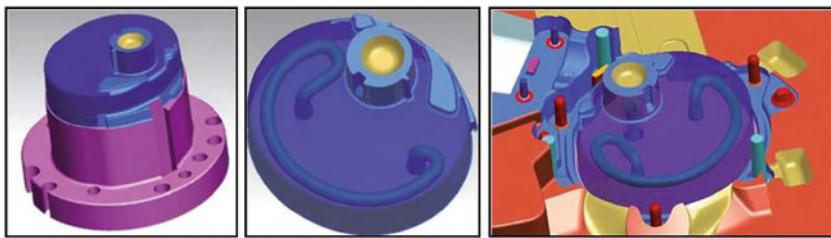


**Abb. 3.67** Pumpgehäuse (*links*) und Problemzone Mantelfläche in Pumpgehäuse (*rechts*) (Sagert und Scholl 2009)

sinnvoll. In Abschn. 3.4.7 wurden bereits zahlreiche Projekte und die optimierten Aspekte beschrieben.

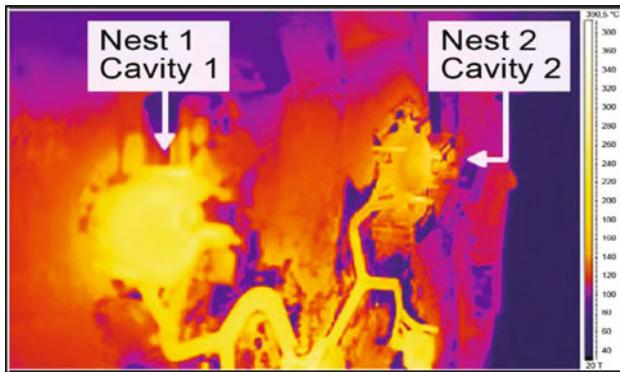
In Abb. 3.66 (*links*) tritt bei einer durch Spritzguss abgegossenen Schutzhülle nach einer relativ schlechten Kühlung Verzug auf, der mit Pfeilen kennzeichnet ist. In diesem Fall wäre eine zusätzliche Optimierungsschleife für Maßkorrekturen unbedingt notwendig. Durch Verwendung eines Schiebers mit konturnaher Temperierung (s. Abb. 3.66 (*Mitte*)) ließ sich diese Verzugsneigung stark minimieren (s. Abb. 3.66 (*rechts*)). Das Produkt genügt allen Anforderungen direkt nach dem Spritzverfahren, deshalb kann auf die aufwändigen Maßkorrektur-Schritte verzichtet werden (nach Kolbe 2010).

Nicht nur die Hersteller von Kunststoffteilen, sondern auch metallische Gießereien profitieren von der nur mittels Generativer Technologien erzielten konturnahen Innenkühlung. Am folgenden Beispiel eines in Serie produzierten Pumpengehäuses der AE Group ist ein deutlicher Vorteil erkennbar. Wie in Abb. 3.67 (*rechts*) erkennbar, liegt bei dem Pumpengehäuse die Problemzone in der Mantelfläche der Pumpenkammer. Aufgrund der Materialanhäufung in diesem anschnittfernen Bereich traten nach dem Abguss an 8–10 % der Teile unzulässige Porositäten auf, was zu einem hohen Anteil von Ausschussteilen führte. Als Optimierungsmaßnahme wurde ein Teileeinsatz mit konturnaher Kühlung in der Innenkontur des Gehäuses eingebaut. Nach Vorbereitung der entsprechenden CAD-Daten



**Abb. 3.68** CAD-Daten des Werkzeugunterteils eines Pumpgehäuses und der Restgeometrie mit konturnaher Kühlung (*links und Mitte*) sowie virtueller Einbau des Einsatzteils (*rechts*) (Sagert und Scholl 2009)

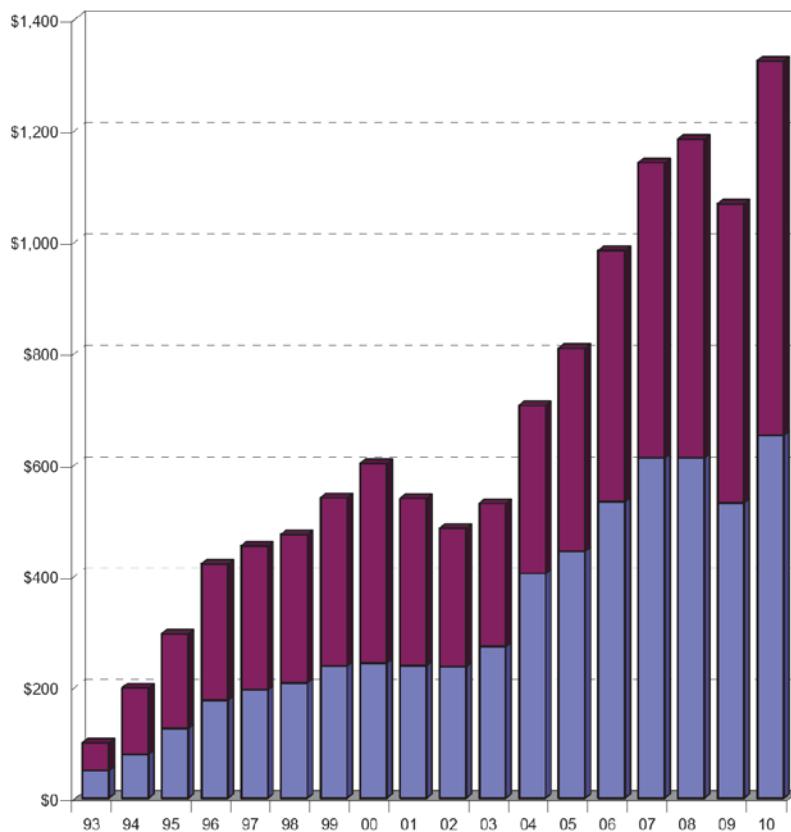
**Abb. 3.69** Wärmebildaufnahme der flüssigen Aluminiumschmelze während des Abgussprozesses eines Pumpgehäuses in *Nest 1* ohne Kühlung und in *Nest 2* mit konturnahem Kühlungskanal im Formeinsatz (Sagert und Scholl 2009)



(s. Abb. 3.68) wurde in Hybridweise mittels LaserCusing der Concept Laser GmbH auf dem Werkzeugunterteil die Restgeometrie mit Kühlungskanal schichtweise aufgebaut (nach Sagert und Scholl 2009). Abbildung 3.69 stellt mittels Wärmebildaufnahme den Wärmezustand der flüssigen Aluminiumschmelze während des Abgussprozesses dar. In Nest 1 beträgt die Temperatur im kritischen Bereich ca. 350 °C. Der neue, mit konturnahem Kühlungskanal integrierte Formeinsatz wurde in Nest 2 verwendet. Hier ist die Temperatur im kritischen Bereich auf 250 °C vor dem Sprühen reduziert. Das flüssige Aluminium kann in Nest 2 schneller abkühlen. Dadurch wird die Lunker- bzw. Porositätsbildung deutlich verringert. Mit der Verwendung von diesem generativ gefertigten Einsatz wurde die Ausschussrate um mehr als 50 % reduziert (nach Sagert und Scholl 2009). Darüber hinaus können gefährliche Risse auf der Oberfläche in Verbindung mit der verbesserten Innenkühlung vermieden werden.

### 3.4.9 Ausblick

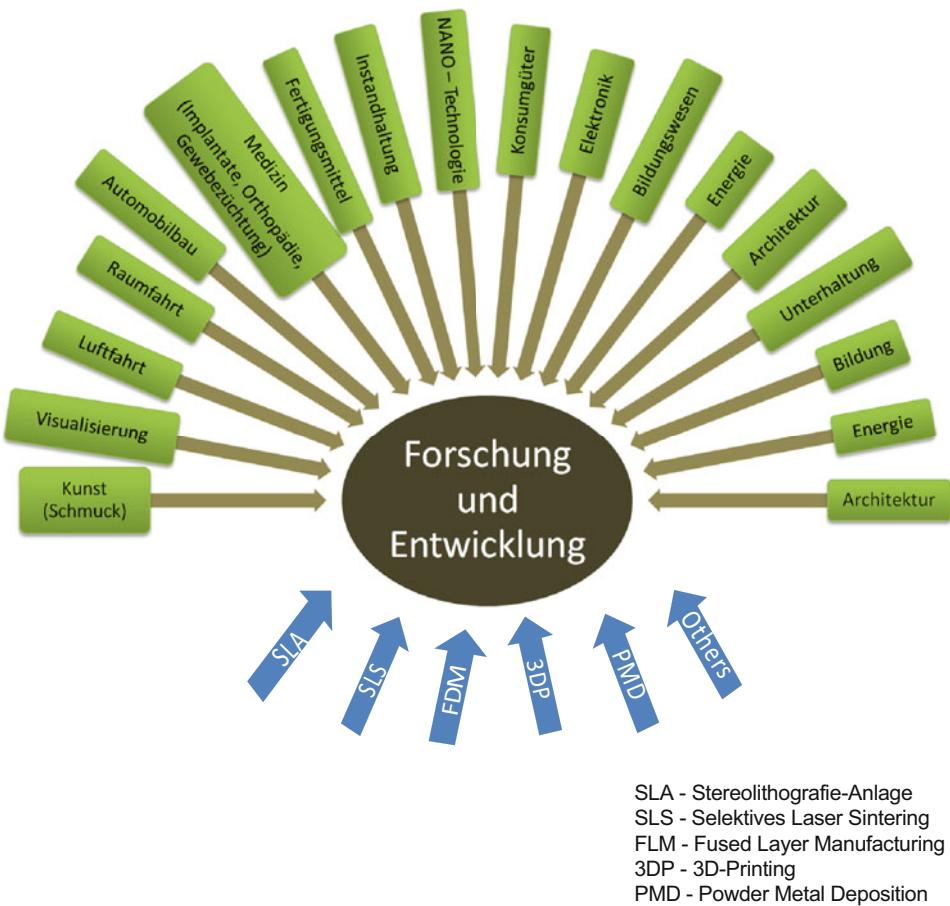
Die dynamische Entwicklung der vergangenen 20 Jahre wird sich zweifellos auf diesem neuen Wissensgebiet weiter fortsetzen. Entsprechend dem Wohlers Report (Wohlers 2011), der jährlich aktuelle Zahlen zu internationalen Statistiken auf dem Gebiet der Generativen Fertigung bzw. des Additive Manufacturing herausgibt, wurde festgestellt, dass für das Jahr



**Abb. 3.70** Weltweiter Umsatz der vergangenen Jahre an durch Additive Manufacturing Technologien gefertigten Produkten (unterer Bereich) und Dienstleistungen (oberer Bereich) (in Million Dollar) (Wohlers 2011)

2010 – trotz der weltweiten Finanzkrise – ein enormer Wachstumsrekord in der Verbreitung und Anwendung der Technologien zu verzeichnen ist (s. Abb. 3.70). Allein der Dienstleistungssektor hat um mehr als 25 % zum Vorjahr zugenommen. Im Vergleich dazu lag die Steigerung bei 6,2 % in 2009 und 7,9 % in 2008. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass viele Unternehmen, besonders durch den zunehmenden Druck der Marktbedingungen bzw. von Zeit, Qualität und Kosten, das Potenzial der Generativen Technologien bereits erkannt haben. Die ebenso von (Wohlers 2011) vorgenommenen Prognosen sagen für 2016 eine Überschreitung der 3 Mrd.- und für 2020 der 5 Mrd.-Dollargrenze voraus.

Das aufgezeigte Potenzial stellt jedoch ebenso Ansprüche an Forschung und Entwicklung. In der in den USA herausgegebenen Roadmap zum Additive Manufacturing (Bourell et al. 2009) wurden für die kommenden 10 Jahre Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte sowie -empfehlungen herausgegeben. Die Schwerpunkte sind bestimmten Kategorien zugeordnet. So besteht besonders im *Design*-Bereich der Anspruch, neue, den Technologien angepasste Methoden zu entwickeln. Ebenso sind Forderungen an den



**Abb. 3.71** Schematische Darstellung des Forschungs- und Entwicklungspotenzials der Generativen Fertigung bzw. des Additiven Manufacturing (nach Bourell et al. 2009)

Bereich der Verfahren und Prozesse sowie der Materialien gestellt. Als die am meisten zukunftsorientierten Gebiete werden Anwendungen im biomedizinischen Bereich sowie im Energiesektor angesehen. In Abb. 3.71 sind die Anwendungsbereiche schematisch dargestellt. Neben der Rolle der Behörden sieht man jedoch nicht zuletzt eine sehr wichtige Verantwortung seitens der Ausbildungs- und Lehrinstitute, die die nächste Generation von Entscheidungsträgern heranreifen lassen. Diese Empfehlungen werden gleichzeitig auch als Trend oder Potenzial betrachtet, in welche Richtung sich die Technologien und Verfahren mittelfristig entwickeln werden bzw. müssen.

Obwohl den USA die traditionelle Pionierrolle des Additive Manufacturing weiterhin zukommt, sind die zunehmenden Beiträge aus der deutschen Hightech-Industrie besonders zu beachten. Deutschland rangiert nach Amerika als die zweite treibende Kraft im weltweiten Vergleich (Wohlers 2011). Dies gilt vor allem für die Entwicklung neuer oder

angepasster Verfahren, aber auch für die Materialforschung. So ist z. B. die direkte Generierung von Bauteilen aus dem Hochtemperaturkunststoff PEEK mittels SLS-Verfahren vom Unternehmen EOS München für spezifische Anwendungsbereiche, wie z. B. Mikroelektronik, Medizintechnik u. Ä., auch international von besonderem Interesse. Darüber hinaus ist die führende Position deutscher Unternehmen im Gebiet der generativen Verfahren für metallische Verfahren (SLM – Selective Laser Melting) von herausragender Bedeutung. Wie in den vorstehenden Kapiteln dargelegt, werden damit für die rationelle Fertigung komplizierter Funktionsteile und auf dem Gebiet der Werkzeugtechnik für thermische Verfahren neue Möglichkeiten erschlossen.

Eine vorantreibende Wirkung von Deutschland geht besonders auch auf dem Gebiet der Standardisierung der generativen Verfahren aus. Nach dem Entwurf einer VDI-Richtlinie (N.N. 2007) wird nun an der Herausgabe einer DIN-Vorschrift bzw. ISO-DIN im europäischen Normenausschuss gearbeitet.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass durch das im Buchbeitrag dargestellte Grundwissen wirkungsvoll dazu beigetragen kann, innovative Weiterentwicklungen in den unterschiedlichen Fachgebieten mitzugestalten. Dies bezieht sich auf wesentliche Aspekte der unmittelbaren Verfahrensentwicklung und auf das Erschließen neuer Anwendungsfelder wie z. B.

- Realisierung der generativen Fertigung mit neuen Materialien und unterschiedlichen Prinzipien auf dem Gebiet der Kunststofftechnik und insbesondere der metallischen Werkstoffe,
- weiteres Erschließen neuer Anwendungsfelder auf allen wesentlichen Gebieten der Rapid Technologien: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing und
- über die derzeitig dominierenden Anwendungsbereiche hinaus werden völlig neue Gebiete erschlossen, wobei medizinisch-biologische Disziplinen besonders zu beachten sind.

---

### 3.5 Produktdokumentation (Sándor Vajna)

Die Aufgabe der Produktdokumentation („Technische Produktdokumentation“ gemäß VDI-Richtlinie 4500 VDI 4500 Blatt 1 (2006)) besteht darin, ein Produkt über seinen kompletten Lebenszyklus hindurch zu begleiten. Die Tätigkeiten reichen dabei vom Festhalten der ersten Entwurfsphasen bis zum Erstellen von Service-Dokumenten und Informationen für den Recycling-Prozess (Gröpper 2010/2011). Beispiele für Dokumente der Technischen Produktdokumentation zeigt Abb. 3.72.

Die VDI-Richtlinie 4500 VDI 4500 Blatt 1 (2006) unterscheidet zwischen interner und externer Technischer Produktdokumentation.

Phasen	Dokumente		
Produktplanung	Kundenauftrag Ausschreibung Marktstudien		
Produktentwicklung	Pflichtenheft Richtlinien Patente Skizzen, Entwürfe	Logikpläne Funktionspläne Prinzipzeichnungen Schaltpläne	Berechnungsunterlagen Layouts weitere Zeichnungen Stücklisten
Produktions- vorbereitung	Zeichnungen Stücklisten Materialbestellungen	Fertigungspläne Betriebsdaten	
Produktion	Vorkalkulation Materialbestellungen Fertigungs-, Montage- und Prüfpläne Bereitstellungsaufträge	NC-Programme Betriebsdaten Nachkalkulation Qualitätsprüfungsdaten	
Produktbetreuung	Prospekte Angebotsunterlagen Verkaufskataloge Reparaturaufträge	Kundendienstvorgaben Wartungsverträge Kundendienstberichte Änderungsmitteilungen	Verbesserungsvorschläge Umbaupläne Verschrottungsaufträge

**Abb. 3.72** Beispiele für Dokumente der Technischen Produktdokumentation (Vajna 2010)

### 3.5.1 Interne Technische Produktdokumentation

Die interne Technische Produktdokumentation enthält alle technischen Informationen über ein Produkt (Terminologien siehe hierzu in DIN 199 Teil 1), die im Unternehmen verbleiben. Sie werden in unterschiedlichen Dokumenten nachvollziehbar festgehalten. Weiterhin umfasst sie alle notwendigen Angaben zu Entwicklung, Fertigung, anwendungsbezogener Prüfung, Instandhaltung, Produktbeobachtung und Entsorgung. Über den Umfang einer internen Technischen Produktdokumentation zu einem Produkt entscheidet immer allein der Hersteller entsprechend den gesetzlichen Forderungen und der Verantwortung gegenüber den Kunden (VDI 4500 Blatt 1 2006). Die Dokumente werden in Dokumentenmanagement-Systemen (DMS) und Produktdatenmanagement-Systemen (PDM-Systeme) verwaltet. PDM-Systeme sind technische Datenbank- und Kommunikationssysteme, die dazu dienen, Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse bzw. Lebenszyklen konsistent zu speichern, zu verwalten und transparent für alle relevanten Bereiche eines Unternehmens bereitzustellen (Vajna 2003). Denn das Know-how kreativer Ingenieurskunst zur Herstellung innovativer Gebrauchs- und Investitionsgüter steckt vor allem in einer Vielzahl unterschiedlicher technischer Unterlagen. Dieses Wissen muss über den gesamten Lebenszyklus der unterschiedlichen Produkte und darüber hinaus verfügbar und wieder verwendbar sein (Vajna und Schabacker 2004).

Üblicherweise treten in einem Unternehmen, in dem eine große Zahl von Beschäftigten in den Bereichen der Produktentwicklung und in anderen Funktionen arbeiten, zahlreiche Probleme auf, die aus einer mangelnden Kontrolle über die Daten in der Produktent-

wicklung und aus unzureichenden Kenntnissen der Prozesse in diesem Bereich resultieren (Vajna und Schabacker 2004):

- nicht eindeutige Dateneingabe,
- Mehrfachversionen von Daten,
- Fehlproduktionen durch fehlerhafte Daten,
- schwammige Produktkonfiguration,
- umständliches Projektmanagement,
- langsames Änderungswesen,
- fehlerhafte Dokumentation,
- lückenhafte Dokumentation der Entstehungsgeschichte,
- zu großer Archivumfang,
- mangelnde Archivtransparenz,
- schwierige interne und externe Kommunikation,
- erschwerte Zusammenarbeit mit Lieferanten und
- komplexe DV-Insellösungen.

### **3.5.2 Externe Technische Produktdokumentation**

Wird in einem Unternehmen von Produktdokumentation gesprochen, ist in der Regel die externe Technische Produktdokumentation gemeint. Die externe Technische Produktdokumentation beinhaltet die Gesamtheit aller Informationen über ein Produkt, die von einem Hersteller/Vertreiber für Vertrieb, Anwender und Verbraucher bestimmt sind. Sie umfasst die Darstellung aller Tätigkeiten, Prozesse und Hilfsmittel, die für die Dokumentation des gesamten Produktlebenszyklus erforderlich sind, z. B. Produktbeschreibungen, Spezifikationen, Zertifikate, Betriebs- und Wartungsanleitung, d. h. alle Dokumente, die für Erstellung, Pflege, Übersetzung, Überarbeitung, Verteilung und Ablage erforderlich sind (VDMA 2005).

Verständlichkeit, Qualität und Nachvollziehbarkeit der externen Technischen Produktdokumentation bestimmen, ob und inwieweit die jeweiligen Zielgruppen die angebotenen Leistungen und Funktionen der Produkte und Prozesse vorteilhaft für sich nutzen können (VDI 4500 Blatt 1 2006).

Die externe Technische Produktdokumentation wird in der Regel elektronisch erstellt, meist mit einem Redaktionssystem, und in einem Dokumentenmanagement- oder einem Content Management-System (CMS) verwaltet. Sie kann in Papierform, auf digitalen Medien und/oder online verteilt werden.

### **3.5.3 Anforderungen an die Technische Produktdokumentation**

In vielen Unternehmen findet die Erstellung der Technischen Produktdokumentation in getrennten Abteilungen statt: Die interne Technische Produktdokumentation wird

im Produktentwicklungsbereich, die externe in der Dokumentationsabteilung (der sog. Redaktion) erstellt.

Dabei ist bereits in frühen Phasen der Produktdokumentationserstellung eine enge Zusammenarbeit gerade zwischen Produktentwicklung und Redaktion sinnvoll. Die Arbeitsabläufe von Produktentwicklung und Redaktion ähneln sich auch insofern, als beide Bereiche heute für ihre Hauptaufgabe, nämlich das Erstellen der Konstruktions- und Dokumentationsunterlagen, die wenigste Arbeitszeit zur Verfügung haben (Gröpper 2010/2011). Erschwerend dabei ist auch, dass beide Abteilungen unterschiedliche IT-Systeme für ihre jeweiligen Aufgaben nutzen.

Für die interne Technische Produktdokumentation werden, wie schon erwähnt, sehr häufig PDM-Systeme eingesetzt. Dies resultiert vorrangig aus den höheren Anforderungen in der Kunden-Lieferanten-Beziehung, den strenger gesetzlichen und technischen Auflagen, Produktivitätssteigerungen und sich immer rascher ändernden Geschäftsprozessen. Unter anderem sind dies (VDMA 2005):

- eine dramatisch wachsende Menge an Daten, Informationen und Dokumenten,
- Beherrschung der Verwaltung einer Vielzahl von Dokumententypen und Formaten aus unterschiedlichen Erzeugersystemen (z. B. Office-Dokumente, Zeichnungen, CAD-Modelle, Berechnungsergebnisse),
- immer komplexer werdende Produkte (z. B. mechatronische Produkte),
- neue Organisationsformen in der Produktentwicklung (Simultaneous Engineering, Concurrent Engineering, firmenübergreifende und standortübergreifende Aktivitäten),
- gestiegene Anforderungen an das Änderungs- und Konfigurationsmanagement (z. B. CMII Guess 2006),
- gestiegene Anforderungen hinsichtlich behördlicher Auflagen (z. B. Produkthaftungsgesetz 1989, Elektro- und Elektronikgerätegesetz 2005, Nachhaltigkeit und Recycling) und
- gestiegene Anforderungen hinsichtlich Qualitätsstandards (z. B. DIN EN ISO 9000 ff, VDA 6.x 2011; ISO/TS 16949 2011, Total Quality Management (TQM), Advanced Product Quality Planning (APQP), SixSigma, usw.).

PDM-Systeme erfüllen heutzutage die oben erwähnten Anforderungen an die Produktentwicklung, jedoch sind sie nach einer Untersuchung der Initiative Engineering Produktiv 2008 in mittelständischen Unternehmen noch nicht so weit verbreitet. Diese Unternehmen setzen sehr häufig Dokumentmanagementsysteme ein, die auch für die externe Technische Produktdokumentation mit einem Redaktionssystem verwendet werden.

Das Verständnis für die externe Technische Produktdokumentation ist von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich. Einigen Unternehmen sehen darin eine „überflüssige“ Kleinabteilung, die vor allem Geld kostet. In anderen Unternehmen gilt die externe Technische Produktdokumentation als Teil des Produktes, die in der gleichen Qualität und Aktualität wie das eigentliche Erzeugnis ausgeliefert werden muss (Gröpper 2010/2011).

Wie jeder Bereich eines Unternehmens unterliegt die Erstellung der internen Technischen Produktdokumentation dem Wandel der Zeit. Heute befinden sich kaum noch Zeichenbretter in den Konstruktionsbüros. Der erste Schritt eines Servicefalles wird in der Regel online durchgeführt, um basierend auf einer genauen Analyse entscheiden zu können, welche nächsten Schritte eingeleitet werden müssen. Das Gleiche gilt für die externe Technische Produktdokumentation: In den meisten Unternehmen hat zunächst der Computer die Schreibmaschine des Redakteurs abgelöst. Inzwischen ersetzen Redaktionssysteme nach und nach das reine Textverarbeitungsprogramm. Solche Anwendungen unterstützen die Dokumentationsabteilungen vor allem dabei, die benötigten Unterlagen entsprechend der zu berücksichtigenden Regeln zu erstellen (Gröpper 2010/2011). Hierzu gehören unternehmensinterne Vorgaben wie die Corporate Identity (CI) oder der VDMA-Redaktionsleitfaden (VDMA 2010) genauso wie regionale, nationale und internationale Gesetze und Richtlinien, wie z. B. die sog. Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (MR 2006), die ATEX-Richtlinie (AR 1994), die Druckgeräterichtlinie (DG 1997), das Produkthaftungsgesetz (1989) oder das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (2005).

### 3.5.4 Einfluss der Technischen Produktdokumentation auf das Unternehmen

Für die tägliche Arbeit der Konstruktionsabteilung spielen folgende Einflüsse eine große Rolle (VDMA 2005):

- *Produkthaftung:* Neue nationale, europaweit und weltweit verbindliche Vorschriften und Normen regeln die Gestaltung und den Betrieb von technischen Geräten und Anlagen. PDM-Systeme bieten nicht nur eine wichtige Unterstützung bei der sicheren Aufbewahrung und raschen Bereitstellung dieser Vorschriften, sondern sie sind darüber hinaus die Basis für die vollständige Dokumentation von technischen Produkten einschließlich sämtlicher Änderungen, die vorgenommen wurden, und der Zeitpunkte, zu denen diese erfolgten. Um die Lesbarkeit und Anzeigefähigkeit digitaler Dokumente bei Aufbewahrungsfristen von 30 Jahren und länger zu gewährleisten, müssen technische und organisatorische Regelungen getroffen werden, die ständig an geänderte technologische Bedingungen und Möglichkeiten anzupassen sind.
- *Wissensmanagement:* In PDM-Systemen werden technisches und organisatorisches Know-how sowie betriebswirtschaftliche Fakten einheitlich und sicher aufbewahrt und unternehmensweit bereitgestellt. Unterlagen aus unterschiedlichen Gewerken, Abteilungen und Standorten können unter übergeordneten Strukturen wie Produktkennungen, Projekte, Zeiträume, Personen und Personengruppen rasch bereitgestellt werden. Dies erlaubt den Zugriff auf Informationen, unabhängig davon, ob dem Suchenden die Existenz und der Inhalt von Dokumenten bekannt sind oder nicht.
- *Qualitätsmanagement:* Produktdaten- und Dokumentenmanagement-Systeme können zur Unterstützung des Qualitätsmanagement-Systems (QM-System) in einem Unternehmen eingesetzt werden. Die in einem QM-System, wie z. B. nach ISO 9000:2000,

dargelegte Maßnahmen zur Lenkung von Dokumenten und Prozessen können durch die zentrale, aktuelle und nachvollziehbare Verwaltung der Daten und Dokumente im PDM-System abgebildet werden. Insbesondere die PDM-Funktionalitäten im Umfeld von Änderungsmanagement, Versionsverwaltung, Workflow und Visualisierung entsprechen den Anforderungen eines QM-Systems.

Als Folge komplexer Produkte und über mehrere Standorte und Unternehmen verteilte Entwicklungs- und Fertigungsprozesse steigt die Zeit, die Produktentwicklung und Redaktion für Recherche sowie Abstimmungs- und Freigabeprozesse benötigen. Gleichzeitig steigen die gesetzlichen Anforderungen an die Produktdokumentation bezüglich Sicherheitshinweise, des Detailgrades von Anleitungen oder gesetzlich festgeschriebenen Übersetzungspflichten für Produktdokumente. Die europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (2011) schreibt beispielsweise vor, dass die produktbegleitende Dokumentation innerhalb der Europäischen Union in die Amtssprache jedes Verwenderlandes zu übersetzen ist. Bei derzeit 23 Amtssprachen ist dieser Aufwand je nach gewünschter Produktverbreitung nicht unerheblich. Die Zahl notwendiger Übersetzungen vergrößert sich mit jedem neuen Schritt in neue Märkte. Nicht zuletzt erwarten Kunden und Verbraucher verständliche und übersichtlich aufbereitete Informationen (Gröpper 2010/2011).

Das Übersetzungsmanagement hat eine Vielzahl von Ausprägungen und Nutzungsscheinungen zur Unterstützung der weltweiten Präsenz (per Katalog, Internet, Messen und Ausstellungen) eines Unternehmens. Ein Unternehmen muss in seinen Publikationen und Beschreibungen alle Besonderheiten der Länder oder Regionen berücksichtigen, in denen es vertreten ist oder einen Markt für sich eröffnen will. Die Technische Produktdokumentation ist Bestandteil des Produktes und muss in der Sprache des Verwenderlandes genauso exakt und präzise sein wie die Dokumentation in der Herstellersprache. Sie wird so wie die Originaldokumentation gestaltet. Hieraus folgt im ersten Schritt: Je höher der Wiederverwendungsanteil der Originaldokumentation ist, desto geringer werden die Kosten auch für die Übersetzung. Zur Unterstützung kommen verschiedene Systeme für die Übersetzung oder für die Terminologie-Verwaltung zum Einsatz (VDMA 2008).

Sehr kosten- und zeitintensive Prozesse bei der Integration von Zuliefer-Dokumentation, der Zusammenarbeit mit Übersetzungsdiensleistern und -systemanbietern, Projektleitung usw. müssen bei der Projektplanung berücksichtigt werden. Im Übersetzungsprozess kommen die vorhandenen Kommunikationsmöglichkeiten wie E-Mail, Internet-Server bis hin zum globalen Informationsmanagement zum Einsatz. Das Übersetzungsmanagement stellt für sich je nach Produktkomplexität, Variantenvielfalt, Unternehmensform und -größe und Exportorientierung/Globalisierung ein eigenes, in die Wertschöpfungskette einzugliederndes umfangreiches Projekt dar, das in vielen Unternehmen großes Optimierungspotenzial enthält (VDMA 2008). Um daher die Übersetzungsprozesse effizient zu gestalten, wird empfohlen, die im VDMA-Leitfaden Übersetzungsmanagement (VDMA 2010) zusammengestellten Normen und Richtlinien zur Erstellung von qualitativ hochwertigen Übersetzungen zu berücksichtigen.

### 3.5.5 Systeme für die interne und externe Technische Produktdokumentation

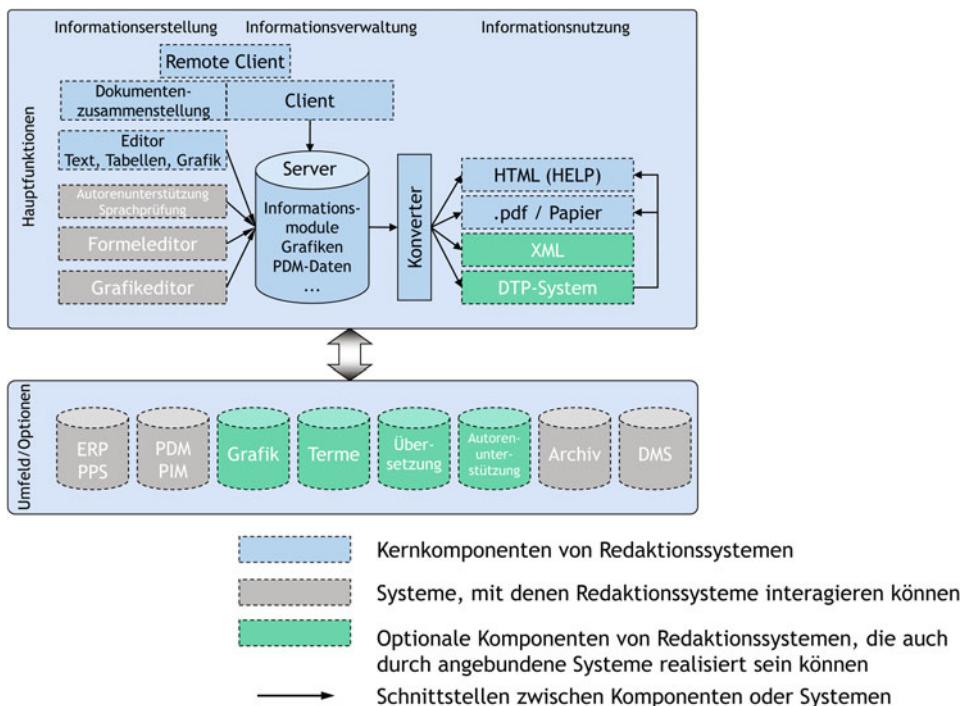
Produktdatenmanagement ist momentan in den Unternehmen der am weitesten verbreitete Sammelbegriff für technisches Daten- und Prozessmanagement für die interne Technische Produktdokumentation. Diesem Begriff ging in der Vergangenheit eine ganze Reihe von Begriffen voraus, die mehr oder weniger Ähnliches meinten und gewissen zeitlich begrenzten Markttrends und der Notwendigkeit der Produktdifferenzierung unterlagen (VDMA 2005).

Der Begriff ERP steht für Enterprise Resource Planning, PPS für Produktions-, Planungs- und Steuerungssystem. PPS ist der stark produktionsseitig orientierte Kernbestandteil eines ERP-Systems, welches darüber hinaus auch Controlling-, Materialwirtschafts-, Logistik- und Vertriebsfunktionen enthält. Heute wird vielfach der umfassendere Begriff ERP auch stellvertretend für den älteren Begriff PPS verwendet. Zurzeit bieten einige ERP-Systeme eigene Module bzw. Erweiterungen mit PDM-Funktionalitäten an, die über reine CAD-Schnittstellen und technisches Dokumentenmanagement hinausgehen. Unterschiede zu spezialisierten PDM-Systemen gibt es im Wesentlichen in der Integrationstiefe zu den Entwicklungssystemen (CAx-Systeme), in der Flexibilität und Funktionalität bezogen auf die Unterstützung der Engineering-Prozesse und im Funktionalitätsumfang im Bereich des Konfigurationsmanagements (VDMA 2005).

Unter Team-Data-Management (TDM) ist der Rechnereinsatz zur 3D-CAD-Modellverwaltung mit integrierter 2D-Zeichnungsverwaltung im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses zu verstehen. In den meisten Fällen wird nur ein einziges CAD-System unterstützt, dafür allerdings mit allen von diesem CAD-System unterstützten Datenformaten. TDM ist daher immer auch ein wichtiger Kernbestandteil eines übergeordneten PDM-Systems (VDMA 2005).

Dokumentenmanagementsysteme (DMS) und die hinsichtlich der Dokumenteninhalte (Contents) wesentlich feiner strukturierten Contentmanagementsysteme (CMS) verwalten Dokumentenstammsätze mit verknüpften Dokumenteninhalten sowie ganze Dokumentenstrukturen zur Aufbereitung für die Produkt- und Prozessdokumentation. Im Vergleich zu PDM-Systemen verwalten sie jedoch keine Teilstämme und bilden daher auch keine Teilestrukturen ab. Aus diesem Grunde kann mit DMS/CMS-Systemen ein Produktdatenmanagement nicht umgesetzt werden, weil dieses als Basis eine Teileverwaltung unbedingt voraussetzt. Eine Funktionsüberschneidung zu den TDM- und PDM-Systemen gibt es im technischen Dokumentenmanagement und in der -archivierung, jedoch nicht in der 3D-CAD-Modellverwaltung (VDMA 2005).

Ziel beim Einsatz von Redaktionssystemen für die externe Technische Produktdokumentation ist die effektive und möglichst hoch automatisierte Erstellung von Anleitungen und ähnlichen beschreibenden Dokumenten. Redaktionssysteme werden in der Dokumentationsabteilung im Allgemeinen von Technischen Redakteuren oder solchen Personen eingesetzt, die mit der Erstellung von Dokumenten betraut sind. Aufgrund der engen Vernetzung der Redaktionsaufgaben mit anderen Unternehmensbereichen (Marketing,



**Abb. 3.73** Systemlandschaft eines Redaktionssystems (VDMA 2010)

Vertrieb, Produktentwicklung usw.) ist es häufig erforderlich, dass ein erweiterter Personenkreis Zugang zum Redaktionssystem erhält, um seine Teilaufgaben im Rahmen des Redaktionsprozesses zu erfüllen (VDMA 2005).

Zentrales Element eines jeden Redaktionssystems ist eine Datenbank für die Verwaltung von Objekten, Metadaten und sonstigen Informationen. Redaktionssysteme besitzen eine Client-Server-Architektur. Aus Anwendersicht stehen die Clients im Mittelpunkt. Bei den meisten Systemen wird zwischen dem eigentlichen Redaktionssystem-Client und dem Editor unterschieden, in dem die Objekte erstellt werden. Zusätzlich kann es auch einen Web-Client zur Anbindung von Mitarbeitern außerhalb der Technischen Redaktion geben. Einige Systeme verfügen ausschließlich über einen Web-Client.

Abbildung 3.73 stellt die typische Systemlandschaft eines Redaktionssystems mit den Systemen für die interne Technische Produktdokumentation dar.

Die Grafikerstellung wird von vielen Redaktionssystemen derzeit nicht unterstützt, während die Grafikverwaltung ein fester Bestandteil ist. Viele Redaktionssysteme bieten Funktionen zur kontrollierten Sprache wie Terminologieunterstützung oder Autorenunterstützung, die auf unterschiedliche Weise realisiert werden (VDMA 2010):

- Anbindung an ein sog. Translation-Memory-System: In diesem Fall wird der Übersetzungsspeicher als Autorenunterstützung mitgenutzt,
- Anbindung an ein Translation-Management-System, um die Abläufe und Prozesse um den Übersetzungsprozess zu verwalten,
- Term- und Satzdatenbank als integrierter Bestandteil des Redaktionssystems und
- Anbindung eines Drittsystems für kontrollierte Sprache.

Die in diesem Abschnitt aufgelisteten Systeme für die interne und externe Technische Produktdokumentation werden im Folgenden als Technisches Produktdokumentationssystem bezeichnet, da deren Auswahl, Einführung und Wirtschaftlichkeitsbewertungen in analoger Weise erfolgen.

### **3.5.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Einführung eines Technischen Produktdokumentationssystems**

Ein Technisches Produktdokumentationssystem (TPDS) in einem Unternehmen erfolgreich einzuführen, nimmt viel Zeit und Kosten in Anspruch. Die Erfahrung zeigt, dass ein bis zwei Jahre benötigt werden, um ein solches Projekt erfolgreich abzuschließen. Umso wichtiger ist es daher, auf bewährte Vorgehensweisen sowie Wissen und Erfahrungen anderer Unternehmen und Institutionen zurückgreifen zu können. Hierzu wurden z. B. die VDI-Richtlinie 2219 (VDI 2219 2002), der VDMA-PDM-Leitfaden (VDMA 2005) oder der VDMA-Redaktionsleitfaden (VDMA 2010) erstellt, um interessierten Unternehmen einen praxisorientierten Wegweiser an die Hand zu geben, der sie bei der Systemeinführung ausreichend unterstützt. An diesen Richtlinien haben Vertreter aus Großunternehmen und mittelständischen Unternehmen sowie aus Hochschulen und Beratungshäusern mitgearbeitet.

Viele mittelständische Unternehmen tun sich zwar sehr schwer bei Investitionen in ein TPDS in der Produktentwicklung, jedoch nicht mit Investitionen in der Fertigung. Immerhin führten sie in den letzten Jahren trotz der damit verbundenen hohen Investitions- und Folgekosten bevorzugt ERP-Systeme zur Fertigungssteuerung ein. Es ist schon immer die Tendenz (in Deutschland) gewesen, alle möglichen Rationalisierungspotenziale zuerst in der Fertigung auszuschöpfen (weil hier die Nutzen aufgrund reproduzierbarer Prozesse schneller und eindeutiger sichtbar werden können) und dem Mainstream zu folgen, ein ERP-System ohne Rücksicht auf die Kosten und Ressourcen eines Unternehmens einzuführen. Die Nutzen eines solchen Systems brauchen dabei üblicherweise nicht nachgewiesen zu werden.

In den produktdefinierenden Bereichen sah es dagegen immer anders aus. Obwohl sie bis zu 75 % der späteren Produktkosten mit ihren Entscheidungen festlegen (Wiendahl 1970), brauchten Produktentwickler stets gute Argumente, um ihre Investitionen in CAx-Anwendungen oder in ein PDM-System zu begründen, angefangen in den 1980er Jahren mit der Einführung von 2D-CAD-Systemen, fortgesetzt einige Jahre später mit 3D-CAD-

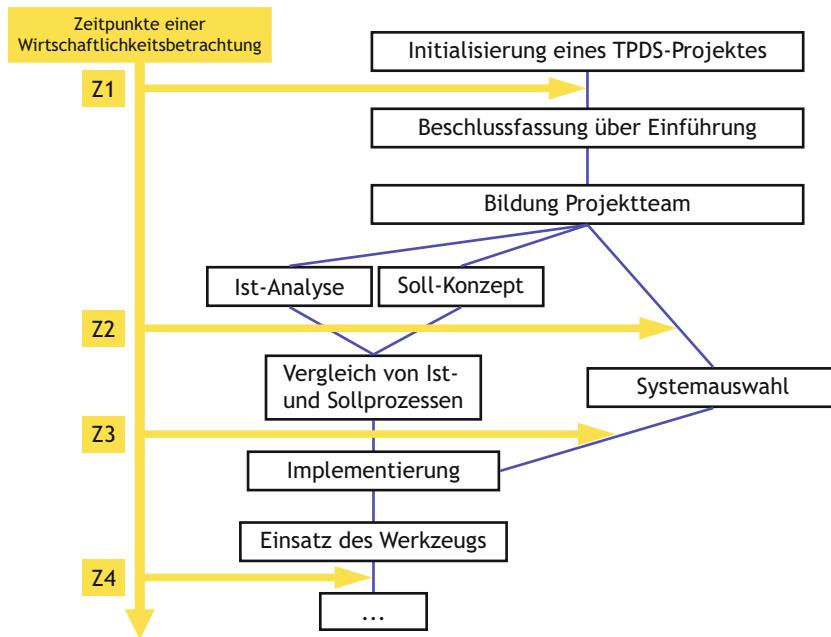
Systemen, jetzt in Zusammenhang mit der Einführung von weiteren CAx-Anwendungen (bevorzugt Berechnungs- und Simulationsanwendungen) oder in ein PDM-System.

Zwar können in der Produktentwicklung mit den vorhandenen statischen und dynamischen Bewertungsverfahren aus der Betriebswirtschaftslehre die Kosten einer Investition in ein TPDS hinreichend genau bestimmt werden. Diese Verfahren sind aber nicht in der Lage, alle Nutzen des TPDS-Einsatzes in einem Nutzenportfolio den Nutzenklassen zuzuordnen und monetär zu quantifizieren. Daher wurde das Benefit Asset Pricing Model (BAPM®) entwickelt, welches sich Analogien aus dem Kapitalmarkt bedient (Schabacker 2001). So konnte nachgewiesen werden, dass das Verhalten von Objekten im Kapitalmarkt aufgrund des Rendite-Risiko-Profils mathematisch gleich dem Verhalten von Nutzenklassen in der Produktentwicklung ist. Ein bestimmtes Objekt kann daher aus dem Kapitalmarkt eineindeutig aufgrund gleichen Verhaltens auf eine Nutzenklasse abgebildet werden. Beispielsweise ist beim direkt quantifizierbaren Nutzen sowohl die Zeit, bis der Nutzen auftritt, als auch seine Größe bekannt. Dieser Nutzen wird in jedem Fall erreicht, also ist kein Risiko vorhanden. Analog verhält sich eine Anlage in Termin- oder Festgeld. Im Gegensatz dazu kann bei einem Synergieeffekt bezüglich der Größe seines Nutzens und der Zeitdauer, bis wann dieser eintritt, keine konkrete Aussage getroffen werden, es liegt daher ein mehrfaches Risiko vor. Genauso verhält sich eine Auslandsanleihe, die mit dem Risiko der Anleihe an sich und dem Währungsrisiko behaftet ist. Mit Hilfe der Portfolio-Theorie von Markowitz (Markowitz 1952) kann dann die Nutzenrendite für eine TPDS-Investition bestimmt werden.

BAPM® liefert mit hoher Präzision (bisher traten Genauigkeiten in der Vorhersage von über 90 % auf) alle erwarteten bzw. angefallenen Nutzen für die im Controlling verwendeten dynamischen Investitionsverfahren zur Bewertung eines TPDS (Kapitalwertmethode, Methode des internen Zinsfußes und Amortisationsdauer). Die erwarteten bzw. angefallenen Kosten ergeben sich aus den dazu benötigten Investitionen in Methoden und Vorgehensweisen des TPDS und dessen laufenden Kosten, wie z. B. für Ausbildung, Anwendung, Pflege und Wartung. BAPM® ermöglicht dabei

- die prospektive Bestimmung von Kosten und Nutzen vor der Einführung eines TPDS, um damit eine bessere Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der am besten geeigneten TPDS-Systemalternative zu bieten, und
- die rückblickende Bestimmung der tatsächlich angefallenen Kosten und Nutzen eines TPDS, sowohl während der laufenden Anwendung (um bisher angefallene Kosten und Nutzen zu erfassen und, falls die angefallenen Kosten und Nutzen nicht den Erwartungen entsprechen, die Anwendung zu verändern), als auch zum Projektende. Mit dem jeweiligen dynamischen Investitionsverfahren kann daraus die Wirtschaftlichkeit des TPDS ermittelt werden.

Es ist allerdings wenig sinnvoll, ein TPDS ohne Beurteilung der dadurch beeinflussten Produktentwicklungsprozesse zu bewerten. Die bekannten dynamischen Investitionsverfahren beinhalten nur die Kosten der Anwendung von Methoden, Vorgehensweisen und TPDS,



**Abb. 3.74** Notwendige Schritte zur Einführung eines TPDS

nicht aber Ressourcenkosten. Sie liefern also keine Aussagen über Kosten- und Zeitersparnisse in einem Produktentwicklungsprozess. Dies ist aber für die Bewertung der Güte eines TPDS unerlässlich, da sich die Effizienz des TPDS gerade in Kosten- und Zeitersparnissen in der Produktentwicklung äußert. Daher bezieht das BAPM®-Verfahren zusätzlich die durch das TPDS unterstützten Aktivitäten in der Produktentwicklung mit ein. Diese Aktivitäten werden zu sog. Prozesselementen zusammengefasst, aus denen durch Konfigurieren und Kombinieren die einzelnen Prozesse in der Produktentwicklung abgebildet werden können.

In Abb. 3.74 werden vereinfacht die notwendigen Schritte zur Einführung eines TPDS mit möglichen Zeitpunkten einer Wirtschaftlichkeitsschätzung dargestellt. Jeder dieser Zeitpunkte beschreibt ein Bewertungsszenario mit den dazu geeigneten Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsschätzung und den zugeordneten Zeitpunkten (s. Abb. 3.75).

Die Anwendung von BAPM® empfiehlt sich insbesondere dann, wenn

- bei den dynamischen Verfahren die Einzahlungen des TPDS so präzise wie möglich vorhergesagt,
- die Synergieeffekte, die in der Regel schwer monetär quantifizierbar oder qualitativ sind, mit anderen CAx-Systemen aufgezeigt und monetär bewertet und
- der optimale Einsatz eines TPDS in den Prozessen des Unternehmens dargestellt werden müssen.

Nr.	Bewertungsszenario	Geeignete Verfahren zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit	Zeitpunkt
1a	Vereinfachte Ermittlung des Return on Investment (RoI) von TPDS-Anwendungen nur mit monetär direkt quantifizierbaren Nutzen	Statische Investitionsverfahren, Dynamische Investitionsverfahren, Kosten-Nutzen-Analyse	Z3, Z4
1b	Ermittlung des Return on Investment (RoI) von TPDS-Anwendungen mit monetär quantifizierbaren und schwer quantifizierbaren Nutzen	BAPM®-Verfahren	Z3, Z4
2a	Alternativenvergleich von TPDS-Anwendungen (ohne Prozessbetrachtung)	Nutzwertanalyse Scoring-Modelle	Z2
2b	Alternativenvergleich von TPDS-Anwendungen (mit Prozessbetrachtung)	BAPM®-Verfahren	Z2
3	Optimierung des Prozesses bei Einführung von TPDS-Anwendungen	Prozesskostenmanagement BAPM®-Verfahren	Z3, Z4
4	Risikobewertung von TPDS-Anwendungen	Risiko-Analyse oder BAPM®-Verfahren	Z1
5	Risikobewertung von TPDS-Projekten		Z1
6	Auswirkungen der TPDS-Anwendung auf Vorhersage von Produktkosten/"time-to-market"/Produktqualität		Z4

**Abb. 3.75** Bewertungsszenarien und geeignete Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 3.5.7 Zusammenfassung

Die externe Technische Produktdokumentation umfasst die Gesamtheit aller Informationen über das Produkt, die für den gesamten Lebenszyklus benötigt wird: Produktbeschreibungen, Spezifikationen, Zertifikate, Betriebs-, Wartungsanleitung u. a. Dagegen gehören CAx-Modelle, Zeichnungen, Stücklisten und Produktionsunterlagen zur internen Technischen Produktdokumentation und werden daher nicht mit zur externen Produktdokumentation mitgezählt. Die externe Technische Produktdokumentation wird in der Regel elektronisch erstellt. Sie wird in Papierform, auf digitalen Medien und online verteilt. Sie umfasst die Dokumentation aller Tätigkeiten, Prozesse und Hilfsmittel, die zur Erstellung, Pflege, Übersetzung, Überarbeitung, Verteilung und Ablage erforderlich sind.

---

## 3.6 Engineering Change Management (Gamal Lashin)

### 3.6.1 Einleitung

#### 3.6.1.1 Aufgaben des Prozesses zum Engineering Change Management

Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Preis und Leistung und die Einhaltung von optimalen Qualitätsstandards sind wichtige Grundlagen zur Platzierung von Produkten am Markt. Die Produkteigenschaften und -merkmale sind in der Regel in der Anforderungsliste (Pflichtenheft) hinterlegt. Diese sind die Basis für die entsprechenden Maßnahmen zur Produktentwicklung, die die Projekt-, Kosten-, Ressourcenplanung und Qualitätsziele beinhaltet. In der Serie bzw. nach der Übergabe des Produktes an den Endkunden

(z. B. beim Anlagenbau) werden jedoch technische Änderungen am Produkt vorgenommen, die im Rahmen eines strukturierten Prozesses bearbeitet werden. Dieser Prozess heißt „Engineering Change Management“ (ECM) Prozess und wird im Deutschen als Änderungsmanagement bezeichnet. Technische Änderungen können u. a. durch Produkt-optimierungen, Funktionserweiterungen, kostensenkende Maßnahmen, veränderte Markt- und Wettbewerbssituationen oder umfassendere Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen erforderlich werden.

Der ECM-Prozess soll vor allem sicherstellen, dass technische und/oder wirtschaftliche Änderungen an Produkten kommuniziert, abgestimmt und termingerecht umgesetzt werden. Das Änderungsmanagement gehört aus diesem Grund zu den wichtigsten und umfangreichsten Prozessen im Produktlebenszyklus, die über Bereichs- und Firmengrenzen hinweg funktionieren. Dieser Prozess bietet außerdem einen Kontrollmechanismus zur Dokumentation und Freigabe von Produktdaten und protokolliert die Änderungshistorie sowie die damit zusammenhängenden Gültigkeiten. Somit stellt das Änderungsmanagement eine wichtige Voraussetzung für eine Nachweisdokumentation dar, die im Rahmen der Produkthaftung erforderlich sein könnte.

### 3.6.1.2 Ursachen für Produktänderungen

Produktänderungen können zahlreiche Anlässe und Motive haben. Im Folgenden werden nur einige Beispiele für häufige Änderungsanlässe aufgeführt (Lashin 2006).

**Konstruktionsoptimierungen** Es handelt sich dabei um typische Konstruktionsänderungen zur Verbesserung der Produktfunktion, zur Beseitigung von Qualitätsproblemen, die z. B. durch den Kundendienst bzw. den Produktservice festgestellt wurden, und zur Reduzierung von Herstellkosten (z. B. durch andere Materialien). Neue oder geänderte Design-Anforderungen für Farbe oder Logogestaltung werden auch in einigen Fällen als Konstruktionsänderungen betrachtet.

**Neue Kunden-/Marktanforderungen** Neue Kunden- und/oder Marktanforderungen z. B. zur Erweiterung der Funktion eines bestehenden Produktes oder zur Erschließung eines neuen Kundenspektrums oder eines neuen Marktsegmentes werden im Rahmen des ECM-Prozesses umgesetzt.

Für neu zu entwickelnde Produkte kann der Engineering Change Management Prozess die Untersuchung und Realisierung von Änderungen an Produkten nach Vertragsabschluss regeln, wie es im Anlagenbau üblich ist.

**Erschließung von Optimierungspotenzialen in der Fertigung** Die Optimierung von Fertigungsprozessen z. B. von Montagevorgängen, Prüfverfahren und Prüfstandvorschriften, Materialprüfungen usw. kann zur Änderung an den Produkten führen. Da hier Zielkonflikte auftreten können, sollte der gesamte Nutzen für das Unternehmen in den Vordergrund gestellt werden.

**Einführung von neuen Lieferanten** Der stetige Kostendruck, die immer steigenden Qualitätsanforderungen und die Vermeidung von Abhängigkeiten zu bestimmten Lieferanten zwingen Unternehmen dazu, neue Lieferanten zu suchen. Produktkomponenten von neuen Lieferanten müssen bestimmte unternehmensspezifische Qualitätsanforderungen und technische Validierungsmaßnahmen erfüllen, die im Rahmen des Änderungsmanagements gesteuert, umgesetzt und dokumentiert werden.

**Abkündigung von Produkten** Es handelt sich in diesem Fall z. B. um den Auslauf von Produkten oder Komponenten. Dieser Fall kann u. a. auftreten, wenn ein Lieferant aus verschiedenen Gründen eine Komponente nicht mehr produziert und dafür eine andere Alternative anbietet. Da diese Maßnahme zu bestimmten Aktionen in der gesamten Prozesskette, wie Erstbemusterung und Validierung, führt, muss sie im Rahmen des Änderungsmanagements umgesetzt werden.

**Verlagerung von Produktionsstandorten** Bei Produktionsverlagerungen handelt es sich um die Verlagerung des Produktionsstandortes, die nicht unbedingt zur direkten Produktänderung führen muss. Vielmehr werden hier die Auswirkungen der Produktionsverlagerung untersucht, ob dadurch u. a. die Produktfunktion, Testvorgaben usw. beeinflusst werden. Besonders kritisch sind Produktionsverlagerungen für sicherheitsrelevante Teile in Länder, wo hohe Qualitätsstandards nicht eingehalten werden können.

Abhängig vom Umfang einer Änderung werden in der Regel die Produktdaten- und Dokumente angepasst, die vor allem durch die Geometrie (CAD-Modelle und zugehörige Zeichnungen), durch „Technische Spezifikation“ sowie durch ERP-Daten (z. B. Stücklisten) bestimmt sind. Zu Stücklistenänderungen gehören u. a. das Hinzufügen, das Löschen oder das Ersetzen von Positionen (Teilen/Baugruppen) in der Stückliste sowie die Änderung der Bauteilmenge.

### 3.6.1.3 Hauptmerkmale des ECM-Prozesses in produzierenden Unternehmen

In den meisten Industrieunternehmen ist der Prozess zum Änderungswesen durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Das Änderungswesen hat einen Einfluss auf die Qualität, die Kosten und den Liefertermin, deshalb erfordert die Umsetzung von Änderungen eine systematische Planung und Durchführung,
- abhängig vom Umfang einer Produktänderung können viele Bereiche und Systeme an der Umsetzung beteiligt sein, dementsprechend kann der Abstimmungsprozess bzw. die Realisierung langwierig sein,
- oft führt mangelndes Prozessverständnis und die Betrachtung des Änderungswesens als lästige Pflicht zu Fehlern im Ablauf, teilweise existiert wenig Disziplin bei der Abwicklung von Produktänderungen,

- bei Änderungen von großen Umfängen ist es schwierig, die durchgängigen Verantwortlichkeiten für notwendige Maßnahmen zu ermitteln und
- Methoden zur Bewertung, Priorisierung und Analyse der Auswirkungen von Produktänderungen werden nicht konsequent verwendet.

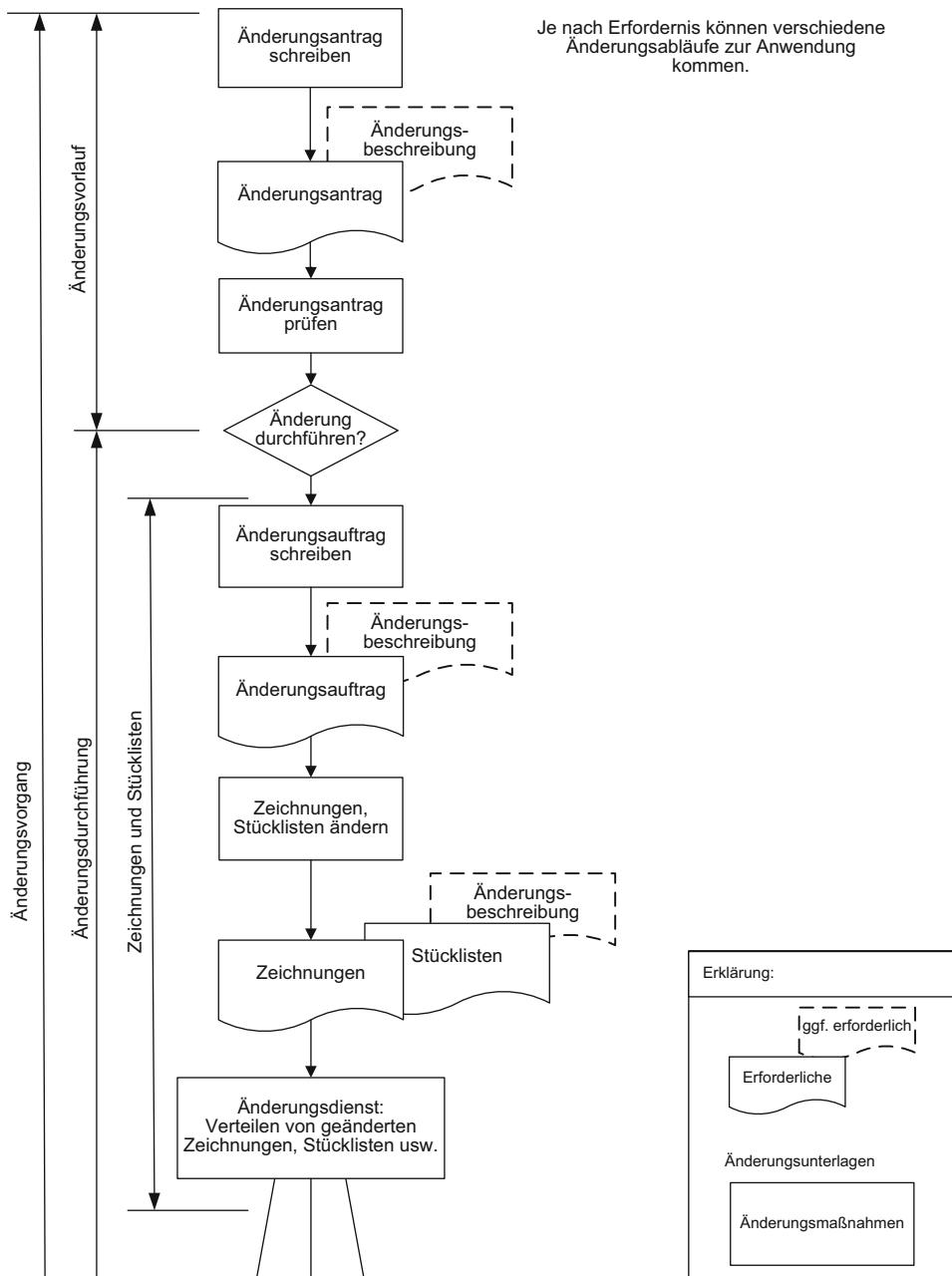
Die Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema Änderungswesen zeigt, dass das Änderungsmanagement in der Fachliteratur noch nicht ausreichend behandelt wurde und Verbesserungspotenziale bei diesem Thema bei Weitem noch nicht ausgeschöpft wurden.

### **3.6.2 Stand der Standardisierung beim Engineering Change Management**

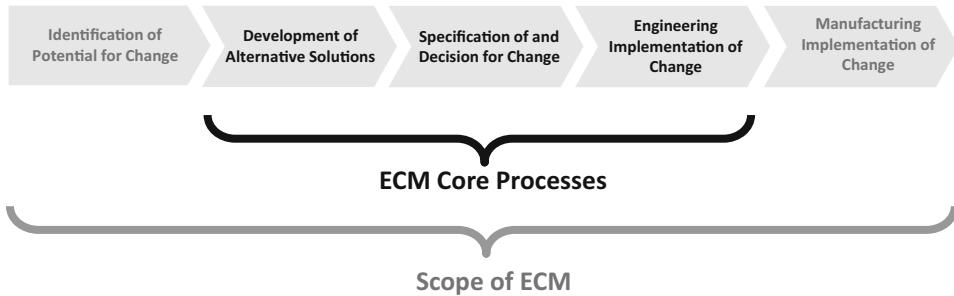
Komplett eigenständige Produktentwicklungen sind heute kaum vorstellbar. Ein Hersteller entwickelt seine Produkte in enger Kooperation mit Lieferanten und/oder Entwicklungspartnern. In der Automobilindustrie ist es üblich, dass Baugruppen wie Bodengruppen, Motoren, Getriebe und Achsen von Lieferanten kommen und in die eigene Fahrzeugmodelle integriert werden. Auch Lieferanten entwickeln nicht alle Bauteile individuell, viele Produkte werden von mehreren Herstellern gleichzeitig bezogen.

Als Folge betreffen Änderungen am Produkt nicht nur ein einziges Unternehmen, sondern u. U. eine ganze Reihe von Unternehmen, die am Produktentstehungsprozess beteiligt sind. Es ist aus diesem Grund zweckmäßig, die Prozesse zum Änderungsmanagement der betroffenen Firmen eng zu verzahnen oder sogar zu vereinheitlichen. In der Automobilbranche ist die Vernetzung von Herstellern und Zulieferern am stärksten ausgeprägt. Doch die zunehmende Globalisierung in der Entwicklung und Produktion in weiteren Branchen führt zu ähnlichen Erkenntnissen.

In der DIN 199-4 sind die Begriffe und die Grundanforderungen für einen Änderungsprozess beschrieben (DIN 199-Teil 4 1981). Dabei wird das Änderungswesen als „die innerbetriebliche Organisation und die dazugehörigen Organisationsmittel zur Änderung von Gegenständen, z. B. von Unterlagen oder Teilen“ definiert. Es schließt weiterhin in der Regel die Folgeänderungen von spezifischen Fertigungs-, Maß- und Prüfmitteln ein. Die DIN 199-4 teilt den Änderungsprozess in den Änderungsvorlauf und die Änderungsdurchführung auf (s. Abb. 3.76). Der Änderungsvorlauf beschreibt den Teil der Änderungsbeantragung bis zur Entscheidung, ob die Änderung realisiert wird oder nicht. Wird die Änderung abgelehnt, wird der Änderungsprozess nicht mehr weitergeführt. Im Falle einer positiven Entscheidung beginnt im Anschluss der Realisierungsprozess, indem aus dem Änderungsantrag ein Änderungsauftrag erstellt und ggf. mit Beschreibungen ergänzt wird. Darauf werden die entsprechenden Dokumentationen wie Zeichnungen und Stücklisten geändert. Die geänderten Dokumente werden an die betroffenen Personen verteilt. Die Beschränkung des Änderungswesens auf Dokumente und Stücklisten ist hier kritisch zu betrachten, da u. a. wichtige Inhalte wie die Suche nach und Bewertung von Lösungsalternativen und die notwendige Abstimmung der erforderlichen



**Abb. 3.76** Der Prozess zum Änderungswesen (nach DIN 199 Teil 4 1981)



**Abb. 3.77** Referenzprozess zum Änderungsmanagement nach VDA 4965 – Teil 0 (Prozessübersicht)

Umsetzungsmaßnahmen mit den betroffenen Bereichen einschließlich externer Stellen nicht beschrieben sind.

Neben der Kennzeichnung und Aufzeichnung von Entwicklungsänderungen verlangt die ISO 9001, soweit angemessen, deren Bewertung, Verifizierung und Validierung sowie die Genehmigung vor ihrer Einführung. Die Bewertung der Entwicklungsänderungen muss die Beurteilung der Auswirkungen der Änderungen auf Bestandteile und auf bereits gelieferte Produkte einschließen. Aufzeichnungen über die Ergebnisse der Bewertung der Änderungen und über notwendige Maßnahmen müssen geführt werden.

Die VDA-Empfehlung VDA 4965 (Teil 0) beschreibt einen Referenzprozess zum Änderungsmanagement in der Automobilindustrie, in den die Änderungen durch Interaktionen einfließen (s. Abb. 3.77). An der Entwicklung der VDA 4965 beteiligten sich Firmen des deutschen Automobilbaus gemeinsam mit Forschungsinstituten und Softwarefirmen mit dem Ziel, Änderungsprozesse zwischen Projektpartnern zu harmonisieren sowie die Kosten und den Aufwand bei der Bearbeitung von Änderungsvorgängen zu minimieren. Mit der Veröffentlichung der 4965 V3.0 ist der Internationalisierungsprozess auf der Ebene SASIG (The Strategic Automotive product data Standards Industry Group) abgeschlossen, um auch die internationale Zusammenarbeit von Herstellern und Zulieferern im Bereich ECM auf eine abgestimmte Basis (Prozesse und Datenmodelle) zu heben.

Der ECM Referenzprozess nach VDA 4965 beinhaltet folgende Phasen (s. Abb. 3.77):

- Identification of Potential for Change,
- Development of Alternative Solutions,
- Specification of and Decision for Change,
- Engineering Implementation of Change und
- Manufacturing Implementation of Change

Die Phasen „Development of Alternative Solutions“, „Specification of and Decision for Change“, und „Engineering Implementation of Change“ bilden den Kern des ECM-Prozesses während die Phasen „Identification of Potential for Change“ und „Manufacturing Implementation of Change“ zum gesamten Umfang der ECM-Aktivitäten gehören.

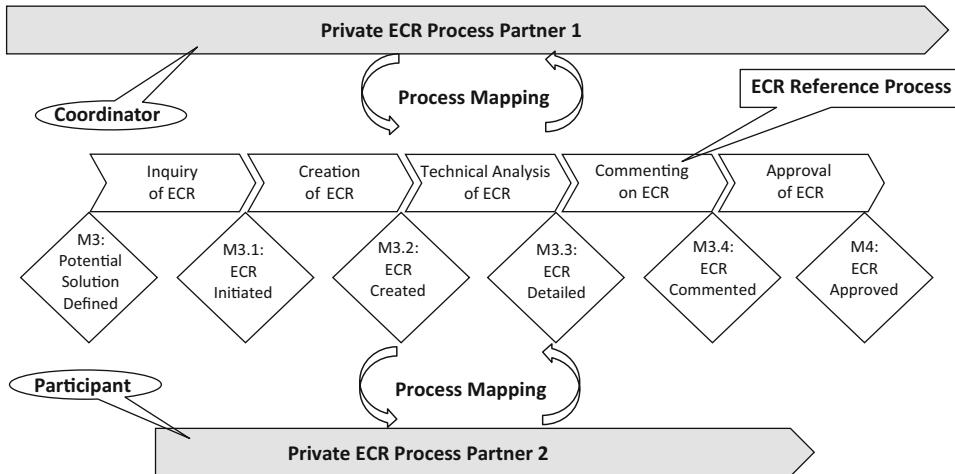
Die ECM-Aktivitäten starten mit der Identifikation von Verbesserungspotenzialen, die auf ihre Wirtschaftlichkeit in der ersten Phase „Identification of Potential for Change“ analysiert werden müssen. Änderungen können auch durch potentielle Risiken oder andere Probleme angestoßen werden. Der Änderungsbedarf kann durch den Endkunden, die Entwicklungsabteilung, den Lieferanten, Tests, die Fertigung von Vorserien, Kostenreduzierungsmaßnahmen, Service usw. festgestellt werden. Die zweite Phase startet, falls die Verfolgung der Änderung aus technischer und/oder wirtschaftlicher Sicht als sinnvoll erscheint.

Die zweite Phase „Development of Alternative Solutions“ beinhaltet die Beschreibung und die Bewertung der verschiedenen Lösungsalternativen für die Implementierung der Änderung. Die ausgewählte Lösung wird hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und technischer Machbarkeit in der Phase „Specification and Decision on Change“ genauer untersucht. Dabei werden die Auswirkungen der Änderungen auf alle betroffenen Bereiche einschließlich externer Partner in Betracht gezogen. Am Ende dieser Phase soll über die Realisierung der Änderung entschieden werden. Nach einer positiven Entscheidung über die Änderung werden nun die CAD-Modelle, die 2-D-Zeichnungen, die Stücklisten bzw. die Produktstrukturen und weitere Dokumente oder Daten durch die Entwicklungsabteilung in der Phase „Engineering Implementation of Change“ angepasst. Abhängig vom Umfang der Änderung werden in dieser Phase andere interne oder externe Bereiche involviert, wie Fertigungsplanung und -logistik, Disposition, Einkauf usw.

Im Anschluss beginnt in der Phase „Manufacturing Implementation of Change“ die Implementierung der Änderung in der Fertigung. Dabei werden u. a. notwendige Anpassungen an Produktionsprozessen und -maschinen durchgeführt, neue und geänderte Teile durch Qualitätsmaßnahmen validiert und erforderliche Änderungen an der Logistikkette vorgenommen.

Die unterschiedlichen Organisationsstrukturen, Prozessabläufe und heterogene und inkompatible IT-Landschaften verhindern die Vereinheitlichung der Prozesse zum Engineering Change Management in den Unternehmen. Aus diesem Grund empfiehlt die VDA 4965 – Teil 0 eine enge Verknüpfung der unterschiedlichen ECM-Prozesse der beteiligten Unternehmen, mit dem Ziel einer besseren Abstimmung durch gezielte Kommunikation während der Umsetzung von Produktänderungen. In diesem Zusammenhang wird die Verantwortung für die Umsetzung einer Produktänderung einem Änderungskoordinator überlassen. Dieser kommuniziert mit anderen beteiligten Unternehmen durch „Participants“ (zu Deutsch Teilnehmer) basierend auf den Standard-Interaktionen und Messages der VDA Empfehlung (s. Abb. 3.78). Die Teilnehmer steuern ihre lokalen ECM-Prozesse und leiten die notwendigen Informationen zu den festgelegten Terminen an den Änderungskoordinator weiter.

Die Grundregeln und Hauptphasen des Prozesses zur Beantragung, Analyse und Freigabe von Änderungsanträgen „Engineering Change Requests, ECRs“ werden in der VDA-4965 (Teil 1) ausführlich beschrieben (VDA 4965-Part 1 (Version 3.0) 2010). Dabei sind Geschäftsfälle mit den jeweiligen Prozessen, Meilensteinen, Rollen und auszutauschenden Informationen definiert. Des Weiteren ist für die IT-Umsetzung ein Datenmodell ent-



**Abb. 3.78** Verknüpfung von ECM-Prozessen (nach VDA 4965-Part 0 (Version 3.0) 2010)

wickelt worden, welches die Implementierung der Prozesse unterstützt. Auch wenn der Fokus bei der Automobilindustrie liegt, sind die Erkenntnisse aus der VDA-Empfehlung für andere Branchen von großer Bedeutung.

Für weitere ausführliche Beschreibungen zum integrierten Änderungsmanagement vgl. Lindemann und Reichwald (1998).

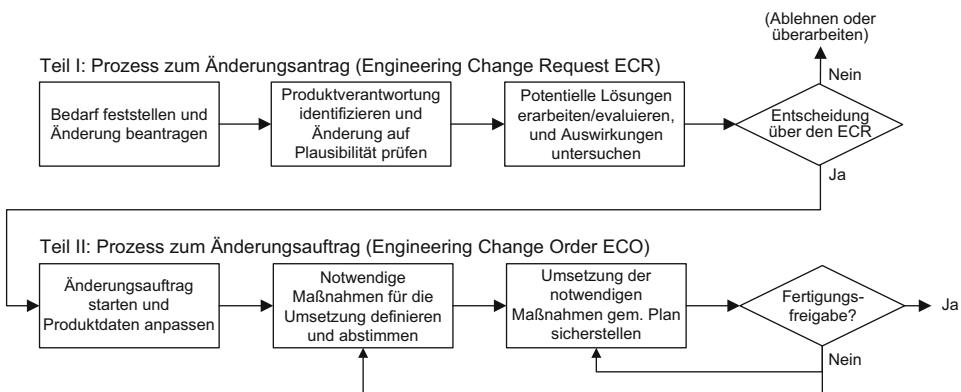
In der Praxis haben sich fürs Änderungsmanagement strukturell die folgenden Arbeitsschritte bewährt. Abweichungen können sich aufgrund von individuellen Prozessabläufen und Unternehmensstrukturen ergeben.

**Schritt 1: Beantragung der Änderung** Der Änderungsbedarf sollte grundsätzlich in einer standardisierten Form als Änderungsantrag eingebbracht werden. Der Änderungsantrag beinhaltet alle notwendigen Informationen zur Änderung.

**Schritt 2: Analyse des Änderungsantrags** Hier sind Untersuchungen durch die jeweiligen Fachabteilungen unabdingbar, da sie die Auswirkungen der Änderung einschätzen können. Dafür müssen alle betroffenen Bereiche identifiziert und eingebunden werden. Bei der Analyse soll auch der benötigte Realisierungsaufwand bezüglich Materialien, Ressourcen, Finanzen, Zeit usw. eingeschätzt werden.

**Schritt 3: Risiko einschätzung** Es soll geprüft werden, ob durch die Realisierung der Änderung unvertretbare Risiken zu erwarten sind.

**Schritt 4: Anweisung der Realisierung** Eine formale Beauftragung der Änderung durch die zuständige Stelle wird durchgeführt.



**Abb. 3.79** Prozessübersicht zum Änderungsmanagement (Vaillant Group)

*Schritt 5: Anpassung der Dokumentation und Daten* Zeichnungen, technische Spezifikationen, CAD-Modelle, Stücklisten etc. werden entsprechend der Änderung angepasst.

*Schritt 6: Dokumentation der Änderung* In einem entsprechenden Dokument wird die technische Lösung zur Realisierung der Änderung beschrieben.

*Schritt 7: Weitere Maßnahmen* Weitere Aktionen außerhalb der Produktentwicklung werden hier definiert, abgestimmt und laut Zeitplan durchgeführt (Fertigungsvorbereitung, Tests, Bestellungen, Logistik, Lieferanteninformation etc.)

*Schritt 8: Änderungsfreigabe* Die verantwortlichen Stellen treffen eine Entscheidung über die Freigabe der Änderung bzw. des geänderten Produkts. Der Freigabeprozess für Produktänderungen kann in mehreren Stufen (Antrag, Auftrag) erfolgen und darf nur durch die zuständigen Stellen ausgeführt werden.

### 3.6.3 Praxisbeispiel eines ECM-Prozesses

Das folgende Praxisbeispiel beschreibt den ECM-Prozess bei der Vaillant Gruppe, einem international aktiven Konzern mit den Schwerpunkten Heiz- und Klimatechnik. Das Unternehmen entwickelt und produziert Produkte, Systeme und Dienstleistungen für Heizen, Kühlen und warmes Wasser an zahlreichen Standorten in Europa, der Türkei und China.

Bei diesem Beispiel wird der ECM-Prozess in zwei Phasen aufgeteilt (s. Abb. 3.79):

Teil 1: Änderungsantrag (Engineering Change Request, ECR)

Teil 2: Änderungsauftrag (Engineering Change Order, ECO)

Der erste Teil des ECM-Prozesses (ECR-Prozess) beschäftigt sich mit der Beauftragung und Analyse von Änderungsanträgen. Dabei werden keine Produktdaten und/oder -dokumente

angepasst. Vielmehr liegt der Fokus des ECR-Prozesses (Teil 1) bei der systematischen Erfassung, Priorisierung, und technisch-wirtschaftlich bereichsübergreifenden Analyse von Produktänderungen.

Der zweite Teil (ECO-Prozess) regelt die Umsetzung der Änderung einschließlich der Anpassung von Daten und Dokumenten und der Definition von Maßnahmen und deren Fälligkeitsterminen sowie der Benennung der verantwortlichen Personen für diese Maßnahmen.

**Der Änderungsantrag (Engineering Change Request, ECR)** Im Rahmen des ECR-Prozesses wird der Änderungsbedarf an Produkten/Komponenten festgestellt und begründet. Informationen über die Stelle, die die Änderung ausgelöst hat, wie Name, Telefonnummer, E-Mail-Adresse, Bereich, Geschäftseinheit, etc., werden zusätzlich im ECR-Formular erfasst. Diese Informationen werden benötigt, falls Rückfragen zur beantragten Änderung bestehen. Eine potentielle Lösung durch den Antragsgeber kann kurz beschrieben werden.

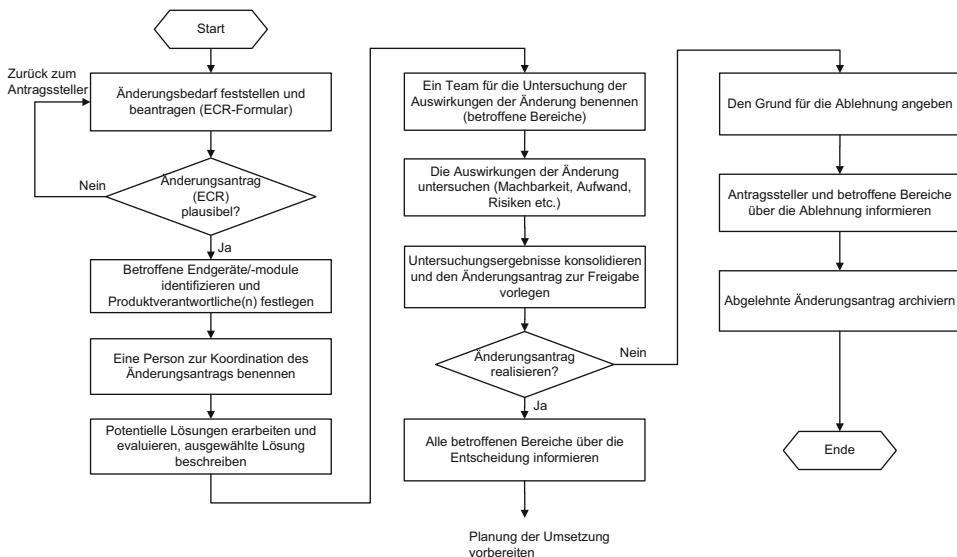
Ein Plausibilitätscheck des vorliegenden Antrages erfolgt durch die Entwicklungsabteilung, die den ECR erhalten hat. Danach werden die betroffenen Produktfamilien und die zuständigen Entwicklungsabteilungen sowie die einzubindenden Produktionsstandorte identifiziert. Vor allem wird festgestellt, welche Entwicklungsabteilung die Bauteilverantwortung hat. Diese übernimmt die gesamte Koordination der nachfolgenden ECR-Aktivitäten.

Anhand des beschriebenen Problems definiert die zuständige Entwicklungsabteilung (Konstruktionsverantwortung) die möglichen Lösungen und wertet diese aus. Die favorisierte Lösung wird im ECR-Formular kurz beschrieben.

Eine zusätzliche Checkliste zur Erfassung von Anforderungen bezüglich Dokumenten (Zeichnungen, Spezifikationsn), Testunterlagen, Zulassungskriterien, Bemusterungsbedarf, Marketinginformation, ERP-Datenanpassung etc. wird im ECR eingepflegt. Abhängig von der Ursache der Änderung können Informationen zur Wirtschaftlichkeit und Qualität angegeben werden.

Die von der Änderung betroffenen Bereiche, wie Entwicklung, Einkauf, Qualität, Zulassung, Fertigung, Ersatzteile etc., werden identifiziert und im ECR-Formular eingetragen. Der ECR wird anschließend an diese Stellen zur Analyse und Beurteilung weitergeleitet. Wie groß ein solcher ECR-Verteiler sein soll, hängt vom Umfang der Änderung ab. Bei kritischen Änderungen mit weitreichenden Auswirkungen besteht der ECR-Verteiler aus mehreren Abteilungen, bei relativ überschaubaren Änderungen beschränkt sich das Gremium auf wenige Bereiche und/oder Mitglieder. Die Mitglieder des ECR-Verteilers sollten ausreichende Erfahrungen aufweisen, um die Auswirkungen der Änderung gründlich einzuschätzen.

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist eine Beurteilung des vorliegenden Änderungsantrags, vor allem bezüglich technischer Machbarkeit, Qualität, Termins und Wirtschaftlichkeit. Während einige Änderungen zu zusätzlichen Kosten führen, bringen andere Kosteneinsparungen ein.

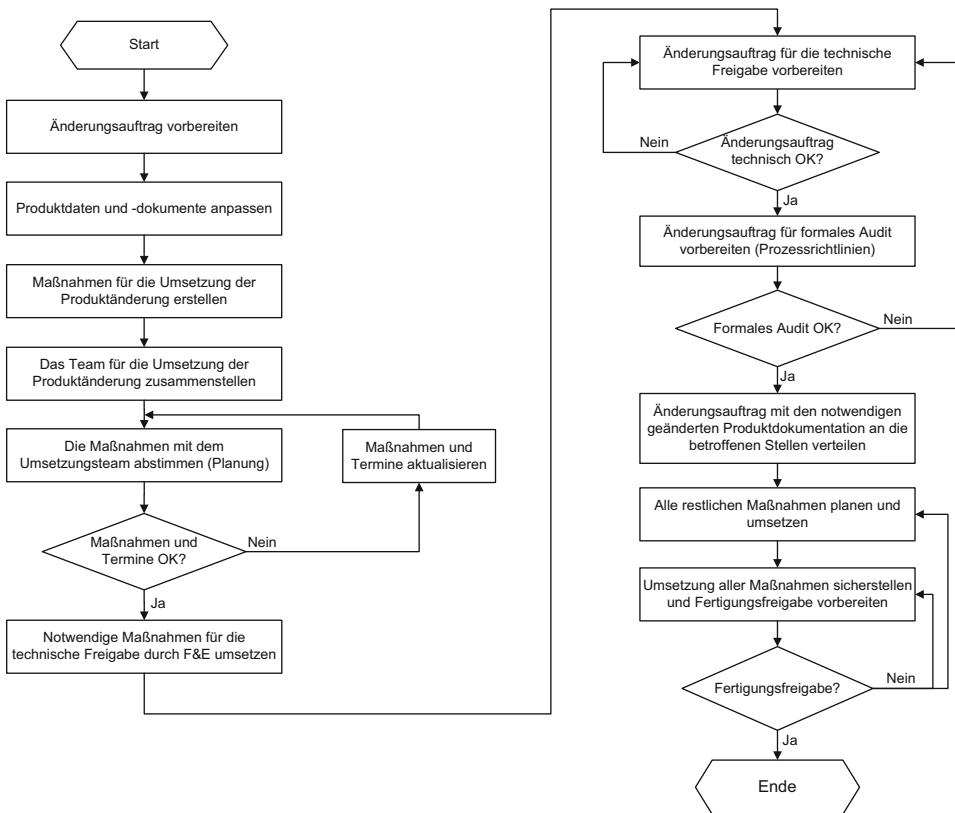


**Abb. 3.80** Beispiel für einen Prozess zum Änderungsantrag (Vaillant Group)

**Genehmigung des Änderungsantrags** Nach der Analyse des Änderungsantrages durch die zuständigen Fachbereiche werden die Ergebnisse konsolidiert. Anschließend wird der Änderungsantrag zur Genehmigung durch den zuständigen F&E-Bereich vorgelegt. Wird ein Änderungsantrag abgelehnt, muss eine Begründung beigelegt werden. Nach der Entscheidung werden alle beteiligten Bereiche informiert. In Abb. 3.80 ist der ECR-Prozess schematisch dargestellt.

Ist die Entscheidung positiv gefallen, wird die Realisierung der Änderung in der zweiten Phase des ECM-Prozesses (Änderungsauftrag) geplant und durchgeführt.

**Der Änderungsauftrag (Engineering Change Order, ECO)** Der Änderungsauftrag umfasst die Beauftragung zur Umsetzung des Änderungsvorhabens, das bereits im Rahmen des ECR-Prozesses (Teil 1) analysiert und zu weiteren Bearbeitung freigegeben wurde (s. Abb. 3.81). Dabei wird eine Person durch die zuständige Entwicklungsabteilung benannt, die die Koordination der notwendigen Umsetzungsaktionen übernimmt. Diese Person kümmert sich u. a. um die Anpassung der technischen Dokumente, die Pflege der Daten in den entsprechenden Systemen und die Definition von relevanten Maßnahmen in Abstimmung mit den betroffenen Bereichen. Es wird konkret festgelegt, ab welchem Datum die Realisierung in die Produktion einlaufen soll. Vor diesem Datum müssen die notwendigen Maßnahmen identifiziert und gemäß Zeitplan umgesetzt werden. Hier einige Beispiele für typische ECO-Aktivitäten:



**Abb. 3.81** Beispiel für einen Prozess zum Änderungsauftrag „ECO“ (Vaillant Group)

- Änderung von relevanten Produktdokumentationen wie technischen Spezifikationen, 3D-CAD-Modelle, 2D-Zeichnungen, Installations-, Bedienungsanleitungen usw.,
- Anpassung von Daten des ERP-Systems wie Stücklisten, Material-, Lager-, Kalkulations-, Einkaufs- und Vertriebssichten,
- wenn Restbestände der zu ändernden Komponenten noch vorhanden sind, soll festgelegt werden, wie mit diesen umzugehen ist. Typische Aktionen sind: Verbrauchen, Verschrotten oder Überarbeiten,
- falls Lieferanten betroffen sind, wird bestimmt, welche Informationen, in welcher Form und wann diese an sie weitergeben werden sollen,
- Planung und Durchführung von qualitätssichernden Maßnahmen für ankommende neue oder geänderte Komponenten,
- Sicherstellung der Bestellung und der Logistikkette für neue oder geänderte Komponenten und
- ist der Markt betroffen, müssen relevante Informationen aufbereitet und kommuniziert werden.

Diese Maßnahmen sollen frühzeitig definiert und mit den betroffenen Stellen im oder außerhalb des Unternehmens bezüglich des Umsetzungsdatums abgestimmt werden. Eine klare Formulierung der Maßnahme reduziert unnötige Abstimmungsrücksprachen bzw. die Durchlaufzeit. Zudem ist es wichtig, die Änderung im Änderungsauftrag umfassend zu beschreiben. Eine eindeutige Änderungsbeschreibung dient dazu, in der Zukunft nachvollziehen zu können, was am Produkt in der Vergangenheit geändert wurde. Die Beschreibung soll sich auf den Kern der Änderung konzentrieren.

**Genehmigung des Änderungsauftrags** Wie beim Änderungsantrag wird ein Änderungsauftrag zur Genehmigung vorgelegt. Bei der Freigabe des Änderungsauftrages handelt es sich um geänderte Produktdaten und -dokumente (CAD, Office-Dokumente, ERP-Daten usw.), die nun für die nachgeschalteten Prozesse, z. B. Beschaffung und Fertigung, zur Verfügung gestellt werden. Nach der Freigabe der Produktdaten und Dokumentation durch die zuständige Entwicklungsabteilung startet die Fertigung die relevanten Umsetzungsmaßnahmen (Maschinen, Disposition, Training, Tests usw.). Der Serienstart wird nach dem Abschluss der notwendigen Validierungs- und Freigabeprozesse in der Fertigung angestoßen.

### 3.6.4 Messgrößen für den Prozess für den ECM-Prozess

Prozesse können verbessert werden, wenn entsprechende zielfgerechte Messgrößen definiert und regelmäßig gemessen und ausgewertet werden. Das gilt auch für den Prozess zum Änderungswesen.

Die *Durchlaufzeit* bei der Umsetzung einer Änderung ist ein wichtiger Indikator für die Prozessqualität. Eine schnelle Umsetzung führt zu schneller Beseitigung von Qualitätsproblemen oder zur schnellen Erfüllung von Markt- und/oder Kundenwünschen. Allerdings ist darauf zu achten, dass umfangreiche oder kritische Änderungen mehr Zeit für die Analyse und für die Umsetzung von notwendigen Maßnahmen in Anspruch nehmen als einfache Änderungen wie Stücklistenanpassungen oder Dokumenten-Updates. Es ist deshalb sinnvoll, die Durchlaufzeit für bestimmte Prozessmeilensteine festzulegen zu messen und auszuwerten.

In einer bestimmten Zeitspanne kann überprüft werden, ob sich das veränderte Produkt bewährt hat oder nicht. Hier können Messgrößen z. B. zur *Qualität* (PPM) oder zur *Kosteneinsparung* definiert, gemessen und ausgewertet werden.

Neben diesen Messgrößen können weitere, unternehmensspezifische Kriterien definiert werden. Formale Prozess-Audits von Änderungsanträgen und -aufträgen können wichtige Indikatoren dazu liefern, ob der Prozess verstanden wird und die Prozessregeln durch die Anwender eingehalten werden. Basierend auf den Audit-Ergebnissen können zusätzliche gezielte Prozessschulungen und Qualifizierungsmaßnahmen durchgeführt werden.

### 3.6.5 Rechnerunterstützung für den ECM-Prozess

Ein papiergebundener bzw. manuell geführter Änderungsprozess zeigt mehrere Schwachstellen. Vor allem die Kommunikation und Abstimmung zwischen den an der Untersuchung und Realisierung beteiligten Personen/Bereichen erweist sich als langwierig. Insbesondere bei Produktänderungen mit tiefgreifenden Auswirkungen spielt dieser Aspekt eine kritische Rolle. Die Verfolgung des Fortschrittes bei der Umsetzung von Produktänderungen ist ein weiterer wichtiger Punkt, der bei manuellen ECM-Prozessen nur mit sehr erheblichem personellem Aufwand durchgeführt werden kann. Eine Übersicht über alle laufenden Änderungen oder die Erstellung von relevanten unternehmensspezifischen Änderungsanalysen ist weiterhin entweder unmöglich oder mit untragbarem personellen Aufwand realisierbar. All diese Schwachstellen führen zu erheblichen Behinderungen bei der Umsetzung von Änderungen und können deshalb negative Auswirkungen auf „Time to Market“, die Qualität und die Kosten im Unternehmen haben.

Heutige Systeme der Informationstechnik stellen flexible Werkzeuge für digitale, Workflow-gesteuerte Änderungsverfahren zur Verfügung. Übersichtliche Änderungsmappen mit den betroffenen Teilen, Dokumenten und Modellen bilden zusammen mit der Vorgangssteuerung das Rückgrat des zielsicheren, digitalen Änderungsprozesses.

Ein wesentliches Ziel des Einsatzes von Workflow-Systemen ist die Verfolgung von Produktänderungen bezüglich des Abarbeitungsgrades, wobei eine einzelne oder mehrere Änderungen zeitgleich betrachtet werden können. Bei einzelnen Änderungen kann ermittelt werden, wer für welche Aufgabe im Workflow zuständig ist und wann er/sie diese erledigt hat. Es wird weiterhin gezeigt, an welcher Stelle sich der Workflow gerade befindet und welcher Person diese Aufgabe zugeordnet ist.

Eine Gesamtübersicht aller laufenden Änderungen kann im Workflow-System generiert werden. Dabei kann man gezielte Auswertungskriterien wie Zeitrahmen, Namen des Initiators der Änderung, Änderungsnummer und -status eingeben.

Ein weiterer Vorteil eines Workflow-unterstützten ECM-Prozesses ist die schnelle und nachvollziehbare Kommunikation und Abstimmung unter den Beteiligten, auch mit externen Lieferanten und Entwicklungspartnern. Alle Prozessschritte werden systemtechnisch dokumentiert und bei Bedarf abgerufen. Der gezielte Einsatz von Workflow-Systemen zur Unterstützung des ECM-Prozesses kann zu erheblicher Zeiteinsparung führen. Allerdings müssen u. a. folgende Punkte bei der Auswahl einer Workflow-unterstützten Lösung beachten werden:

- Internetbasierte Systeme erleichtern die Kommunikation in einer heterogenen IT-Landschaft,
- da die Anzahl der am ECM-Prozess beteiligten Personen in der Regel hoch ist, führt eine solche Lösung zu erhöhten Kosten für Systemlizenzen, Training und Anwenderbetreuung,
- in einer globalen Entwicklungsumgebung ist die Sprachunterstützung bei der Systembedienung von Bedeutung,

- da die beteiligten Personen heterogenes Know-how bezüglich IT-Systeme haben können, ist eine einfache und verständliche Systembedienung eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Lösung und
- da der ECM-Prozess weitere Sub-Prozesse steuern kann, ist zu beachten, dass offene Schnittstellen zu anderen Systemen insbesondere zu ERP-Systemen (Enterprise Ressource Management) zur Verfügung gestellt werden müssen.

---

## 3.7 Kostenmanagement (Florian Kauf)

### 3.7.1 Einleitung

Auch für den Konstrukteur und Entwickler ist die Auseinandersetzung mit den Produktkosten und deren Optimierung mittlerweile ein wesentlicher Aspekt seiner täglichen Arbeit. Im folgenden Kapitel werden daher grundlegende betriebswirtschaftliche Begriffe und Zusammenhänge, die Zusammensetzung der Produktkosten und deren Beeinflussung durch die Arbeit des Konstrukteurs und Entwicklers erläutert.

Die betriebswirtschaftliche Zielsetzung eines Unternehmens ist die Realisierung eines Gewinns. In der unternehmensinternen Bewertung wird dieser Gewinn als Differenz aus Erlös bzw. Leistungen und Kosten ermittelt. Der Erlös ist vom erzielten Verkaufspreis und der verkauften Anzahl an Produkteinheiten abhängig. Die Kosten stellen den Verbrauch an notwendigen Produktionsfaktoren dar. Somit hängen Verkaufspreis und entstandene Kosten für die Erstellung des Produktes nur mittelbar zusammen. Da der Erlös bzw. der erzielbare Verkaufspreis und somit die verkauften Einheiten maßgeblich vom Markt – dem Kunden – beeinflusst werden, gilt es für die unternehmensinterne Optimierung der Wertschöpfungskette, die Kosten möglichst gering zu halten. Der Wechsel vom sog. Verkäufermarkt zum Käufermarkt seit den 1960er Jahren erhöhte den Druck auf die mit der Erstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung verbundenen Entstehungskosten. Während in einem Verkäufermarkt die Nachfrage größer ist als das Angebot, besteht somit die Möglichkeit für die Unternehmen, höhere Kosten an die Kunden durch höhere Preise weiterzugeben. Im Käufermarkt hingegen besteht ein Überangebot, so dass die Unternehmen gezwungen sind, einen marktüblichen Preis nicht zu übersteigen. Da sich in der Konsumgüterindustrie immer mehr Märkte nun zu einem sog. Erlebnismarkt weiterentwickelt haben, in dem die Erfüllung individueller Kundenbedürfnisse im Vordergrund steht, müssen die Unternehmen individuelle Produkte zu möglichst geringen Kosten herstellen bzw. zu geringen Preisen anbieten. Dies kann durch ein effektives Kostenmanagement erreicht werden. Laut Franz und Kajüter (2007) wird Kostenmanagement wie folgt definiert: „Kostenmanagement ist die gezielte und systematische Steuerung der Kosten. Ziel ist es, durch konkrete Maßnahmen die Kosten von Produkten, Prozessen und Ressourcen so zu beeinflussen, dass ein angemessener Unternehmenserfolg erzielt und die Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig verbessert wird.“

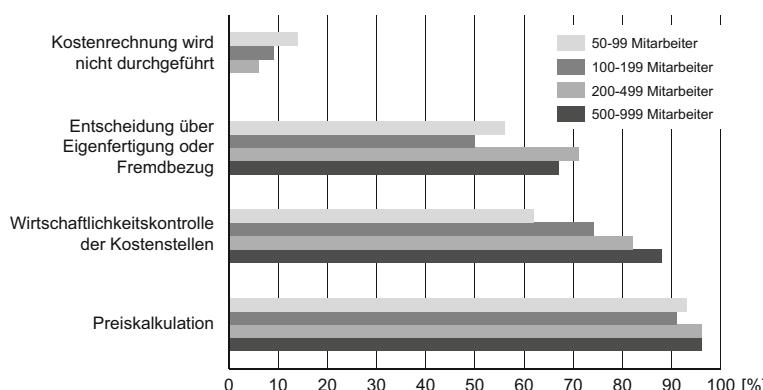
Da bis zu 70 % der Produktkosten maßgeblich in der frühen Phase der Entwicklung festgelegt werden (VDI-Richtlinie 2235 1987), gilt der frühzeitigen Festlegung der Zielkosten des zukünftigen Produktes sowie der Abschätzung der zukünftigen Kosten des Produktes besonderes Augenmerk (Feldhusen und Gebhardt 2008). Methoden wie Target Costing (Horváth 2006; Horváth und Arnout 2001) und Design to Cost sind daher gängige Ansätze in der Praxis, die hier unterstützen und im Folgenden erläutert werden.

### 3.7.2 Produktkosten

Kosten stellen den in Geldeinheiten bewerteten Verbrauch an notwendigen Produktionsfaktoren dar. Der Begriff Kosten wird in der DIN 32990 (DIN 32 990, Teil 1 1990) und in der Richtlinie VDI 2234 (VDI-Richtlinie 2234 1990) ausführlich definiert und erläutert. Die Definition lautet: Kosten sind der in Geld bewertete Verzehr von Produktionsfaktoren und Fremdleistungen sowie öffentlichen Abgaben zum Erstellen und zum Absetzen von Gütern und/oder Diensten. Produktionsfaktoren sind Betriebsmittel, Material, menschliche Arbeit usw.

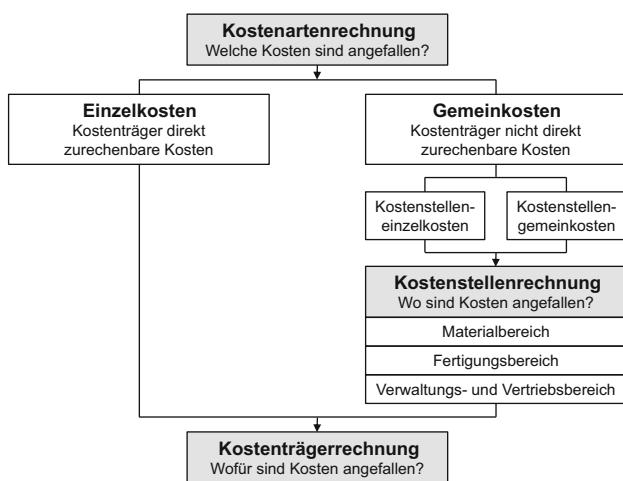
Entscheidend für eine erfolgreiche Optimierung der Kosten im Unternehmen ist die Schaffung von Transparenz der Kostenentstehung. In der Praxis übernimmt diese Aufgabe u. a. die Kostenrechnung als Teil des betrieblichen Rechnungswesens. Dort werden Erfassung, Verteilung und Zurechnung der Kosten durchgeführt, um damit die Wirtschaftlichkeit der Unternehmensaktivitäten zu kontrollieren und eine Basis für die Kalkulation des Angebotspreises zu schaffen. Die Begriffe und Prozesse der Kostenrechnung erfolgen nach einem einheitlichen Schema, sind jedoch im Detail ebenso wie die jeweils verfolgte Zielsetzung unternehmensspezifisch.

Abbildung 3.82 zeigt eine Übersicht, zu welchem Zweck Unternehmen die Kostenrechnung abhängig von der Mitarbeiteranzahl durchführen. Über alle Unternehmensgrößen hinweg dient die Kostenrechnung vor allem der Preiskalkulation und in tendenziell größeren Unternehmen zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit. Falls eine Kostenrechnung überhaupt nicht durchgeführt wird, so trifft dies nur in sehr kleinen Betrieben zu.



**Abb. 3.82** Einsatzbereiche der Kostenrechnung (nach Ehrlenspiel et al. 2007)

**Abb. 3.83** Übersicht der Kostenrechnung (Götze 2010)



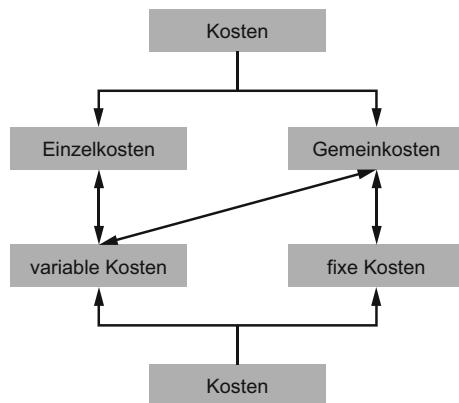
Die Kosten in einem Unternehmen können abhängig von der Unternehmensgröße mehrere Milliarden Euro betragen. Um diesen Umfang handhabbar zu machen, werden die Kosten abhängig vom Informationsziel der Kostenrechnung üblicherweise in drei Bereiche untergliedert:

1. Kostenartenrechnung (Erfassung) – Welche Kosten sind angefallen bzw. werden angefallen?
2. Kostenstellenrechnung (Verteilung) – Wo sind die Kosten angefallen bzw. werden sie angefallen?
3. Kostenträgerrechnung (Zurechnung) – Wofür sind die Kosten angefallen bzw. werden sie angefallen?

In Abb. 3.83 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt sowie eine weitere Untergliederung der Kostenarten in Einzel- und Gemeinkosten. Diese werden in diesem Kapitel detailliert erläutert.

**Kostenartenrechnung** Kostenarten können noch weiter nach den sog. Produktionsfaktoren untergliedert werden, wie z. B. Personal- und Materialkosten, Kosten für Fremdleistungen oder kalkulatorische Abschreibungen. Zu den Personalkosten zählen u. a. die Löhne der Arbeiter aus der Fertigung und die Gehälter der Angestellten aus der Entwicklung. Materialkosten sind Rohstoffkosten wie Holz für die Herstellung von Möbeln, aber auch Hilfsstoffe wie Nägel und Leim sowie Betriebsstoffe wie Schmiermittel. Kosten für Fremdleistungen sind z. B. die FEM-Berechnungen, welche von einem externen Ingenieurbüro durchgeführt werden. Da Maschinen im Produktionsprozess einer Alterung und einem Verschleiß unterliegen, müssen die Kosten für eine Anschaffung über die Nutzungsdauer berücksichtigt werden. Hierzu werden kalkulatorische Abschreibungen ermittelt, z. B. für

**Abb. 3.84** Zusammenhang zwischen Einzel- und Gemeinkosten sowie variablen und fixen Kosten



die kontinuierliche Abnutzung eines Fräskopfes oder den Ersatz einer veralteten Drehbank durch eine moderne CNC-Maschine. Die Kostenartenrechnung liefert damit Daten für die ihr nachgelagerte Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung.

Eine weitere Möglichkeit der Untergliederung von Kostenarten, wie in Abb. 3.84 dargestellt, ist die Abhängigkeit vom Beschäftigungsgrad bzw. Auslastungsgrad (fixe und variable Kosten) sowie die Abhängigkeit bezüglich der Art der Zuordnung (Einzel- und Gemeinkosten).

Einzelkosten sind Kosten, die direkt einem Produkt zuzuordnen sind, wie z. B. der Lohn des Arbeiters, der für die Erstellung eines Werkstücks eine bestimmte Zeitspanne benötigt, oder die Materialkosten, aus denen das Werkstück gefertigt wird. Gemeinkosten, wie Strombedarf des Unternehmens und Mieten für Betriebsgebäude, sind hingegen einem konkreten Produkt nicht direkt zuzuordnen.

Kosten, die vom Beschäftigungsgrad unabhängig sind, werden als fixe Kosten bezeichnet. Dies sind ebenfalls z. B. Mieten für Betriebsgebäude oder Kosten für Versicherungen des Unternehmens, wie eine Brandschutzversicherung. Variable Kosten sind abhängig vom Beschäftigungsgrad bzw. leistungsmengenabhängig. Bei gegebener Kapazität verändern sie sich mit der Leistung, also mit der Produktionsmenge. Werden mehr Tische in einem Möbelunternehmen produziert, so steigt auch der Strombedarf für Produktionsanlagen und die Kosten an geliefertem Holz.

Wie in Abb. 3.84 dargestellt, zeigen die erwähnten Beispiele, dass Gemeinkosten sowohl variabel als auch fix sein können (Strombedarf des Unternehmens und Miete für Betriebsgebäude), hingegen können Einzelkosten nie fix sein.

**Kostenstellenrechnung** Die Kostenstellenrechnung ist das Bindeglied zwischen Kostenarten- und Kostenträgerrechnung. Sie beschäftigt sich mit der Frage wo, d. h. in welchen Bereichen des Unternehmens, Kosten entstehen bzw. entstanden sind. Diese Frage bezieht sich vor allem auf die Gemeinkosten des Betriebes, da die Einzelkosten den Kostenträgern, d. h. den Produkten, direkt zugeordnet werden können. Zur Beantwortung dieser Frage werden daher Bereiche im Unternehmen gebildet. Diese kostenmäßig abge-

schlossenen Bereiche sind klassischerweise die Fachabteilungen z. B. der Entwicklung und Meistereien der Fertigung, aber auch der interne Fuhrpark, die Kantine oder die Werksbibliothek sind mögliche Kostenstellen. Diesen werden pro Abrechnungsperiode (z. B. pro Quartal) die aus der Kostenartenrechnung ermittelten Gemeinkosten zugeordnet. Die Kostenstellenrechnung zeigt somit auf, an welchen Stellen im Unternehmen die Kosten anfallen bzw. angefallen sind, da die einzelnen Kostenträger die Unternehmensressourcen unterschiedlich stark beanspruchen. Sie schafft also die Voraussetzung, dass Unternehmen mit mehreren Produkten die erfassten Gemeinkosten auf die Kostenträger, d. h. die Produkte, weiterverrechnen können sowie eine Grundlage für die Bewertung von Beständen an Halb- und Fertigfabrikaten unter Einbeziehung der Gemeinkosten, siehe auch Coenenberg (2009). Eine weitere Aufgabe der Kostenstellenrechnung ist die Bewertung der unternehmensinternen Wirtschaftlichkeit, wie z. B. die Einhaltung von Kostenbudgets der jeweiligen Abteilungen.

Um die aus der Kostenartenrechnung erfassten Gemeinkosten möglichst richtig den Kostenstellen zuzuordnen, müsste bekannt sein, welchen Anteil an den Gemeinkosten eine Kostenstelle hat. In der Praxis ist diese eindeutige Zuordnung jedoch nicht gegeben. Daher werden Bezugsgrößen festgelegt, die idealerweise eine konstante Proportionalität zu den verursachten Gemeinkosten pro Kostenstelle darstellen. Ist für die Beschreibung des gesuchten Zusammenhangs nur eine Bezugsgröße nötig, so spricht man von einer homogenen Kostenverursachung. Dies könnte im Fertigungsbereich die Fertigungszeit pro Werkstück sein. Aufgrund der heterogenen Kostenverursachung in der Praxis würde man bei Berücksichtigung mehrerer Bezugsgrößen für die Beschreibung der Abhängigkeiten von Gemeinkosten pro Kostenstelle ein genaueres Ergebnis erhalten. So sind die Kosten von Transportzeit, Rüstzeit, Bearbeitungszeit, Maschinenlaufzeit usw. abhängig. Durch die Erfassung mehrerer Bezugsgrößen wird die Verrechnung zwar genauer, allerdings auch deutlich komplizierter, so dass man in der Praxis versucht, eine möglichst charakteristische Bezugsgröße zu wählen. Die Berücksichtigung mehrerer Bezugsgrößen pro Kostenstelle wird bei der Prozesskostenrechnung berücksichtigt. Diese wird im Rahmen von modularen Produktbaukästen und Standard- bzw. variantenbehafteten Komponenten immer häufiger notwendig (s. Abschn. 4.5), um eine verursachungsgerechte Kostenaussage machen zu können. Die in Abb. 3.85 dargestellten Bezugsgrößen von Schweitzer und Küpper (2008) stellen einen Überblick gängiger Mengen- und Wertschlüssel dar.

Somit ist z. B. die Stellfläche eine gute Bezugsgröße, um anteilig die Gemeinkosten aufgrund der Gebäudemiete auf eine CNC-Fräsmaschine umzulegen, zusätzlich kann auch die Leistungsaufnahme in kWh der Fräsmaschine für die Umlage der Stromkosten erfolgen.

Die Kostenstellenrechnung erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Zuordnung der in der Kostenartenrechnung erfassten Gemeinkosten zu Kostenstellen
2. Verrechnung innerbetrieblicher Leistungen
3. Bildung von Zuschlagsätzen für die Kostenträgerrechnung

Mengenschlüssel	Wertschlüssel
<b>Zählgrößen</b> z. B. Zahl der eingesetzten, hergestellten oder abgesetzten Stückzahl, Zahl der Buchungen	<b>Kostengrößen</b> z. B. Fertigungslohnkosten, Fertigungsmaterialkosten, Herstellkosten
<b>Zeitgrößen</b> z. B. Fertigungszeit, Maschinenstunden, Rüstzeit	<b>Einstandsgrößen</b> z. B. Wareneingangswert, Lagerzugangswert
<b>Raumgrößen</b> z. B. Länge, Fläche, Volumen	<b>Absatzgrößen</b> z. B. Warenumsatz, Kreditumsatz
<b>Gewichtsgrößen</b> z. B. Einsatzgewichte, Transportgewichte Produktmengen in Gewichtseinheiten	<b>Bestandsgrößen</b> z. B. Bestandswert an Stoffen, Zwischen- oder Endprodukte, Anlagenbestandswert
<b>Technische Maßgrößen</b> z. B. kWh, PS, km, J	<b>Verrechnungsgrößen</b> z. B. Verrechnungspreise

**Abb. 3.85** Bezugsgrößen für die Kostenverteilung (nach Schweitzer und Küpper 2008)

In Schritt 1 werden die in der Kostenartenrechnung erfassten Gemeinkosten pro Abrechnungsperiode (auch primäre Kosten genannt) den Kostenstellen zugeordnet. Die Zuordnung sollte entsprechend dem Verursachungsprinzip erfolgen, sofern dies möglich bzw. wirtschaftlich sinnvoll ist. Verwendung finden hier die oben dargestellten Bezugsgrößen.

In Schritt 2 erfolgt die Leistungsverrechnung zwischen Kostenstellen des Unternehmens, da Leistungen einiger Kostenstellen keinen direkten Bezug zum Produkt haben, wie z. B. die Werkskantine. Die Kosten dieser sog. Vorkostenstellen werden entsprechend ihrer Inanspruchnahme, z. B. abhängig von der Bezugsgroße Mitarbeiteranzahl, auf die Endkostenstellen (wie Meistereien in der Montage) verrechnet.

In Schritt 3 werden für die Endkostenstellen periodenbezogene Zuschlagssätze gebildet. Dabei werden die gesamten einer Endkostenstelle zugeordneten Gemeinkosten zu einer bestimmten Bezugsgroße (s. Abb. 3.85, z. B. Zahl der hergestellten Stücke, Leistungsaufnahme in kWh einer Maschine) in Relation gesetzt. Somit ergeben sich Zuschlagssätze für z. B. Material- und Fertigungskosten sowie die Nutzung von Maschinen.

$$\text{Materialgemeinkostenzuschlagssatz} = \frac{\text{Materialgemeinkosten (MGK)}}{\text{Materialeinzelkosten}}$$

$$\text{Fertigungsgemeinkostenzuschlagssatz} = \frac{\text{Fertigungsgemeinkosten (FGK)}}{\text{Fertigungseinzelkosten (Fertigungslöhne)}}$$

$$\text{Maschinenstundensatz} = \frac{\text{Fertigungsgemeinkosten (FGK)}}{\text{Maschinenstunden}}$$

$$\text{Vertriebsgemeinkostenzuschlag} = \frac{\text{Vertriebsgemeinkosten (VtGK)}}{\text{Herstellkosten des Umsatzes}}$$

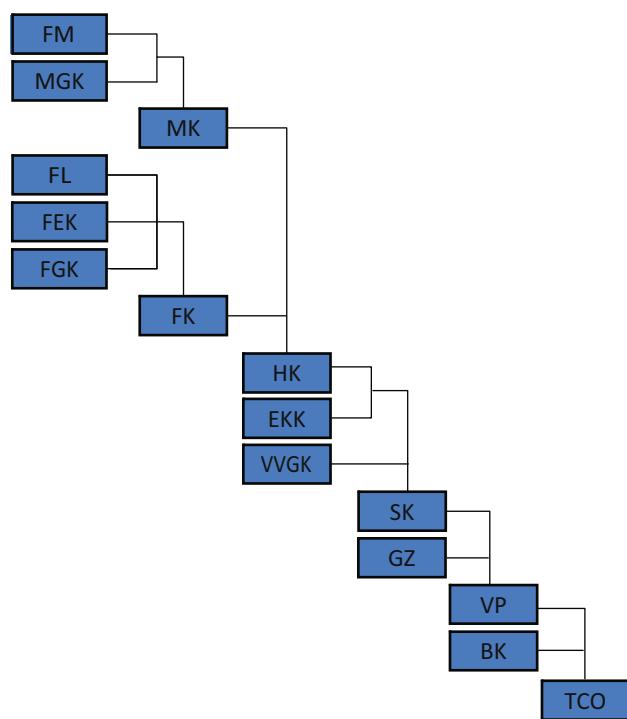
Die hier vorgestellte Zuschlagskalkulation wird dort angewandt, wo mehrere Produkte mit unterschiedlichem Materialeinsatz, unterschiedlichen Fertigungsverfahren und somit zeitlich unterschiedlicher Inanspruchnahme der Kostenstellen hergestellt werden. Klassische Industrien hierfür sind z. B. der Maschinen- und Anlagenbau.

Bei Einprodukt-Unternehmen mit gleichmäßiger Produktionsmenge ohne Lagerhaltung (z. B. Stromerzeuger) wird die sog. einfache Divisionskalkulation verwendet, die detailliert in Coenenberg et al. (2009) beschrieben ist. Werden mehrere Produkte in einer Großserie und geringem Gemeinkostenanteil erstellt (z. B. Biegen von Federn bei Materialgleichheit), wird eine mehrfache Divisionskalkulation eingesetzt (Coenenberg et al. 2009). Sind die Unterschiede der Produkte größer (z. B. Federn mit unterschiedlicher Geometrie, aus unterschiedlichem Material und deutlich verschiedenen Stückzahlen), so wird die Äquivalenziffernkalkulation eingesetzt (Plinke und Rese 2006).

**Kostenträgerrechnung** Die Kostenträgerrechnung beantwortet die Frage, wofür Kosten angefallen sind bzw. anfallen werden. Kostenträger sind Produkte und betriebliche Leistungen des Unternehmens, die einen Wertverzehr verursachen und daher die Kosten tragen sollen. Beispiele sind Fahrzeuge eines Automobilherstellers bzw. entsprechende Komponenten eines Zulieferers oder auch Dienstleistungen wie eine Beratung als „Produkt“ einer Unternehmensberatung. Die Kostenträgerrechnung besteht aus den zwei Bereichen Kostenträgerstückrechnung (Kalkulation) und Kostenträgerzeitrechnung. Aus Sicht des Entwicklers ist vor allem die Kostenträgerstückrechnung relevant. Hier werden die Kosten einzelner Leistungseinheiten als stück-, los- oder auftragsbezogene Kosten bestimmt. Dies können die sog. Herstellkosten sein, d. h. die Summe aus allen Einzel- und Gemeinkosten des Materials und Fertigungsbereichs, und/oder die sog. Selbstkosten, d. h. Herstellkosten zuzüglich Verwaltungs- und Vertriebskosten. Diese Ermittlung ist wichtig für die mögliche Entscheidung des Produktkonzeptes, Fertigungsverfahrens oder Produktionsprogramms.

Der oben beschriebene Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Kostenarten ist in Abb. 3.86 dargestellt. Die Materialkosten (MK) ergeben sich aus den Kosten für das Fertigungsmaterial (FM) und über einen Zuschlagssatz der zugehörigen Materialgemeinkosten (MGK). Die Fertigungskosten (FK) sind die Summe aus den Fertigungslöhnen (FL), den Fertigungseinzelkosten (FEK) sowie ebenfalls über einen Zuschlagssatz den entsprechenden Fertigungsgemeinkosten (FGK). Material- und Fertigungskosten ergeben die Herstellkosten (HK). Die Selbstkosten des Unternehmens (SK) sind die Kosten für die Herstellung (HK), die Entwicklung und Konstruktion (EKK) sowie Verwaltung und Vertrieb (VVGK). Damit würde sich bei einem Verkaufspreis des Produktes (VP), der den Selbstkosten entspricht, ein Gewinnzuschlag (GZ) von Null ergeben. Aufgrund strategischer Überlegungen wird in Einzelfällen von Unternehmen bewusst kein oder nur ein geringer Gewinn für ein Produkt angestrebt, um z. B. existierende Fertigungsbereiche während einer ungünstigen Marktsituation (teilweise) auszulasten. Aus Sicht des Kunden sollte jedoch der Verkaufspreis auch aus ökonomischen Aspekten nicht das alleinige Kaufargument sein. Abhängig vom Produkt sind die während der Nutzungsdauer entstehenden Betriebskosten (BK) u. U. sehr viel höher oder übersteigen den Verkaufspreis bereits nach kurzer Dauer. Beispiele

**Abb. 3.86** Zusammenhang unterschiedlicher Kostenarten



für Betriebskosten sind Kraftstoffkosten, Versicherung und Steuer, Reparaturkosten oder Bereifung eines Fahrzeuges. Die sog. „total cost of ownership“ (TCO) müssen daher für den längerfristig Agierenden im Vordergrund seiner Kaufentscheidung stehen.

**Total cost of ownership und Life cycle costing** Die Berücksichtigung und Optimierung der entstehenden Kosten über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes (Total cost of ownership TCO und Life cycle costing LCC) sind wichtige Ziele der Produktentwicklung. Auch Aspekte der Nachhaltigkeit (z. B. Energieverbrauch und Recyclingfähigkeit) sollten hierbei berücksichtigt werden. Die Anfänge der Bewertung von TCO und LCC liegen in den 1930er Jahren und stammen aus den Bereichen Anlagen- und Maschinenbau. Der Einsatz und die Durchführung von TCO- und LCC-Analysen sowie die Definition der Begriffe TCO und LCC sind allerdings bis heute in der Literatur uneinheitlich dargestellt (Geißdörfer 2009). Zwei wichtige Unterscheidungskriterien zwischen TCO und LCC sind jedoch zumeist gegeben, nämlich

- TCO berücksichtigt auch Transaktionskosten im Detail, die im Rahmen der Kaufvertragsgestaltung entstehen oder Transportkosten des fertigen Produktes und
- TCO wird zum permanenten Kostenmanagement z. B. für Investitionsentscheidungen eingesetzt.

Obwohl noch keine industrieübergreifende standardisierte Vorgehensweise für eine einheitliche Bewertung von TCO/LCC existiert, haben verschiedene Institutionen praxisnahe Bewertungsmodelle entwickelt (VDMA 34160 2006; VDI-Richtlinie 2884 2005). Generell muss hierbei die Frage beantwortet werden, welche Kosten über die Lebenszykluszeit anfallen. Hierzu ist ein dreistufiger Prozess durchzuführen:

1. Rahmenbedingungen festlegen
2. Daten sammeln, auswerten und Prognosewerte abschätzen
3. Ergebnis plausibilisieren und aufbereiten

Praktische Erfahrungen zeigen, dass im ersten Schritt die Rahmenbedingungen festgelegt werden müssen. Zu klären ist hierbei, welcher kundenspezifische Anwendungsfall zu beschreiben ist, welches Produkt (Komponente, Baugruppe, System) untersucht werden und welche Berechnungsgrundlage verwendet werden soll. Zur strukturierten Identifikation der Kosten wird im zweiten Schritt analog dem VDMA Einheitsblatt-34160:2006 eine Einteilung der Kosten in die Kategorien Entstehung, Betrieb und Verwertung vorgenommen. Abhängig vom zu untersuchenden Produkt und dem kundenspezifischen Anwendungsfall kann eine weitere Detaillierung dieser Kategorien analog Abb. 3.87 durchgeführt werden (VDMA 34160 2006). Aus der Kostenrechnung des Unternehmens sind bestehende Daten z. B. für Materialkosten zu sammeln sowie Erfahrungswerte aus vorhergehenden oder ähnlichen Projekten auszuwerten und auf dieser Basis Kosten im Sinne einer Prognose abzuschätzen.

Die Kosten werden für einen Betrachtungszeitraum von 1 Jahr geschätzt und mit der geplanten Nutzungsdauer multipliziert. Im dritten Schritt werden die Ergebnisse plausibilisiert und für eine Entscheidungsvorlage oder Vertragsgestaltung aufbereitet. Diese strukturierte Kostenaufstellung bietet damit eine hervorragende Basis für die Identifikation von Stellhebeln zur Kostenoptimierung. Besonders hervorzuheben ist hier, dass die Kostenstellhebel vor allem aus Kundensicht attraktiv sind und der Kunde somit einen unmittelbaren Vorteil daraus erhält.

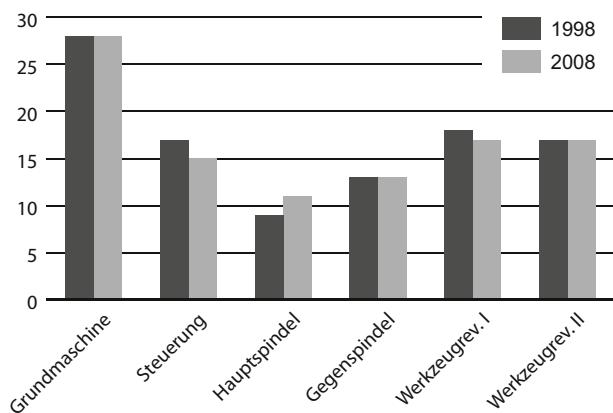
**Typische Kostenstrukturen** Unter Kostenstrukturen versteht man die Unterscheidung von Kosten anhand unterschiedlicher Kriterien. Sie dienen der Schaffung von Transparenz bei der Ermittlung und Vorgabe von Kostenzielen sowie der Identifikation von effektiven Stellhebeln, um die Kostenziele zu erreichen. Eine Gliederung von Kostenstrukturen kann z. B. anhand der folgenden Kriterien nach Ehrlenspiel et al. (2007) erfolgen:

- Kosten für die Erfüllung von Anforderungen z. B. „geringe Wartungskosten“, „elegantes Design“ und „einfache Handhabung“. Die Kundenanforderungen müssen häufig in der Entwicklung in messbare Ziele übersetzt werden,
- Kosten für Produktfunktionen z. B. Heben, Fixieren, Geräusch dämmen,
- Kosten nach Baugruppen und Komponenten,
- Kosten von A-, B- und C-Teilen,
- Material- und Fertigungskosten,

**Abb. 3.87** Kosten zur Berechnung der LCC/TCO analog VDMA Einheitsblatt-34160:2006

Entstehung	Euro / a
Beschaffung	
Infrastrukturkosten	
sonstige Entstehungskosten	
<b>Betriebskosten</b>	
Wartung und Inspektion	
Instandsetzung	
ungeplante Instandsetzung	
Raumkosten	
Materialkosten	
Energiekosten	
Hilfs- und Betriebsstoffe	
Entsorgungskosten	
Personalkosten	
Werkzeugkosten	
Rüstkosten	
Lagerkosten	
sonstige Betriebskosten	
<b>Verwertungskosten</b>	
Rückbau	
Restwert	
sonstige Verwertungskosten	

**Abb. 3.88** Vergleich der Herstellkosten anhand von Baugruppen eines Drehzentrums Baujahr 1998 und 2008



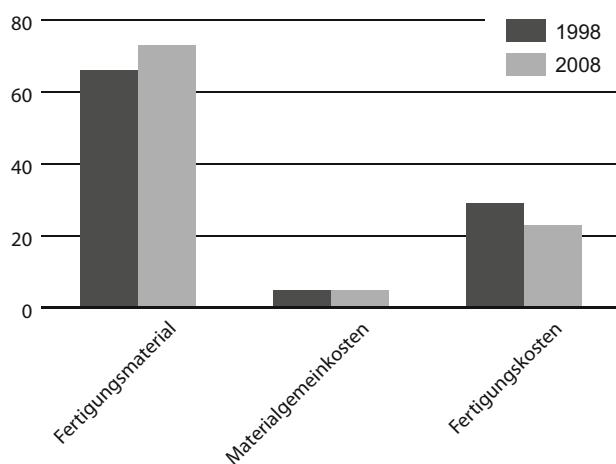
- Fertigungskosten bezüglich einzelner Arbeitsgänge z. B. Form reinigen, Antihaltbeschichtung auftragen, Schmelze einbringen, Bauteil entnehmen, Form reinigen . . . ,
- Fertigungskosten aus Rüst- und Einzelzeiten z. B. Werkzeug einspannen, Maschine kalibrieren, Werkstück einspannen, Bauteil bearbeiten,
- Kosten nach Anteilen der Lebenszykluskosten z. B. Wartungskosten und Kosten für Betriebsstoffe während der Nutzungsdauer des Produktes und
- fixe und variable Kosten.

Im Folgenden wird dies anhand eines Drehzentrums als wichtiges Fertigungswerkzeug z. B. im Maschinen- und Automobilbau erläutert. Die Bauform des betrachteten Drehzentrums ist eine sog. zweispindlige Schrägbettmaschine mit zwei Werkzeugrevolvern. Sie besteht aus den Baugruppen Grundmaschine (Maschinenbett, Hydraulik, Pneumatik, Achsantrieb, Maschinenverkleidung), zwei Werkzeugrevolvern, einer Haupt- und Gegenspindel sowie der CNC-Steuerung.

In Abb. 3.88 ist die typische Kostenverteilung nach diesen Baugruppen für ein Drehzentrum aus dem Jahr 1998 und 2008 nach eigenen Untersuchungen aufgeführt. Obwohl sich die absoluten Kosten im betrachteten Zeitraum verändert haben, sind die relativen Kostenanteile der einzelnen Baugruppen praktisch gleich geblieben. Gründe hierfür liegen im nicht veränderten Bauprinzip und der gleichbleibenden Funktionsstruktur (s. Kap. 4.5). Im Übrigen bedingt dies eine nur geringfügige Veränderung der Produktkosten.

Eine andere Kostenstruktur ist durch die in Abb. 3.89 dargestellten Kostenarten gegeben. Ein Blick auf das fremdbezogene Fertigungsmaterial ließe vermuten, dass verglichen mit dem Anteil von 1998 mehr Umfänge fremdvergeben wurden und die (internen) Fertigungskosten tendenziell fallen. Würden immer größere Umfänge extern gefertigt, so müsste mit einem kontinuierlichen Know-how-Verlust gerechnet werden. Um zu klären, für welche Baugruppen diese Vermutung gilt, müssten die Kostenarten z. B. auf Basis der Hauptkomponenten analysiert werden. Dies könnte mit den Ergebnissen der Kostenartenrechnung durchgeführt werden. Auch eine Klassifizierung z. B. in A-, B- und C-Teile würde Transpa-

**Abb. 3.89** Vergleich der Herstellkosten anhand von Baugruppen eines Drehzentrums Baujahr 1998 und 2008

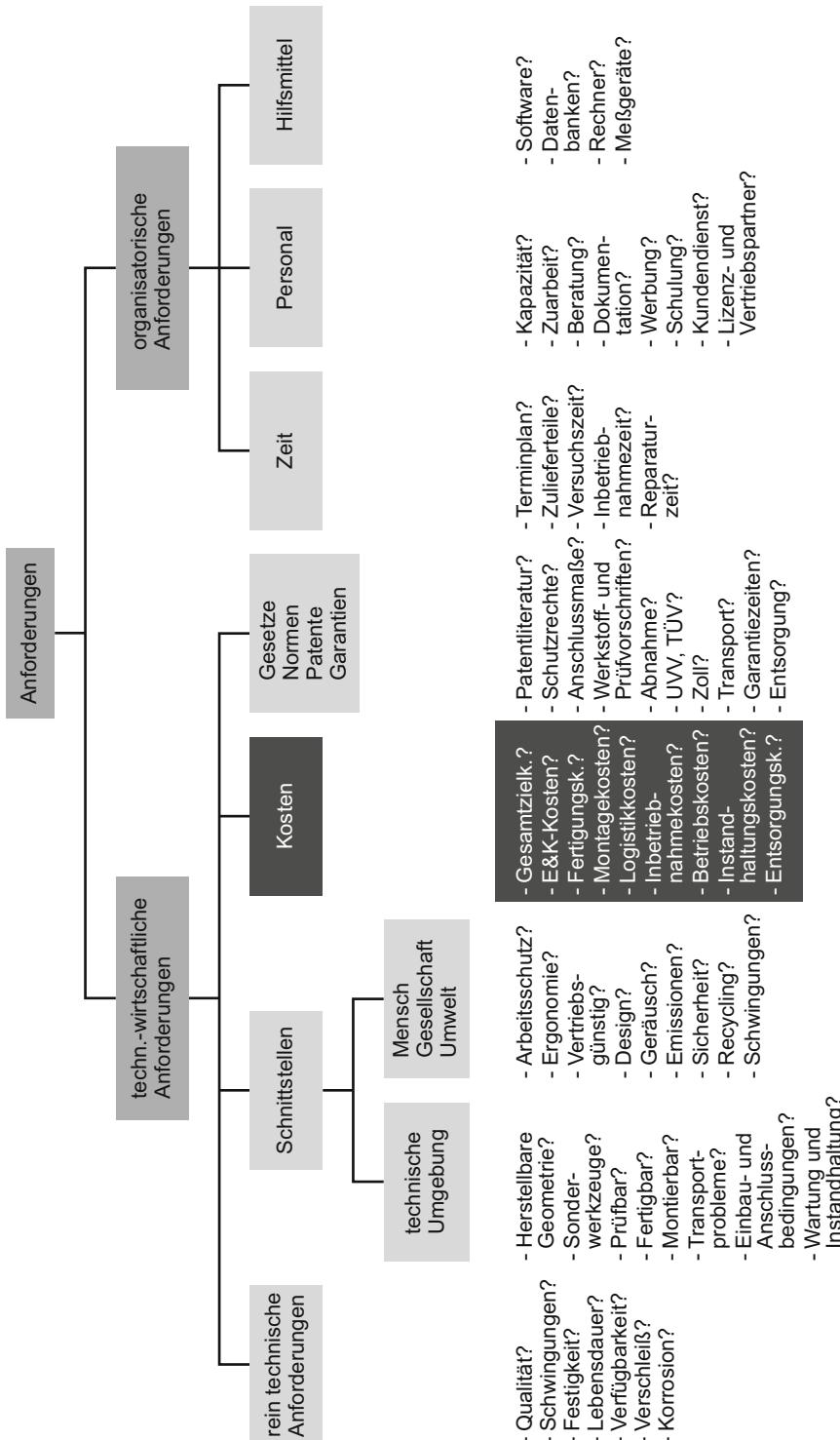


renz schaffen. Sogenannte A-Teile haben einen hohen Wertanteil (ca. 80 %) am Produkt, tragen jedoch teilemäßig nur wenig bei (10–20 %). Die Entwicklung und Produktion von A-Teilen sind häufig Kernkompetenzen des produktstellenden Unternehmens. B-Teile weisen einen Wertanteil von ca. 15 % aus und tragen zu ca. 30 % an Teilen bei. C-Teile wie Schrauben, Unterlagscheiben, evtl. Standardlager haben einen Wertanteil von ca. 5 %, machen jedoch teilemäßig 50 % und mehr des Produktes aus. Da die Kernkompetenzen baugruppenabhängig sind, sollte das Unternehmen die Fremdfertigung der C-Teile sowie ausgewählter B-Teile anstreben. Je nach Perspektive auf die Produktkosten (z. B. baugruppenorientiert) lassen sich somit Stellhebel für eine Optimierung identifizieren.

### 3.7.3 Einflussfaktoren auf die Produktkosten

Bisher wurden die Produktkosten sowie ihre Erfassung, Verteilung und Zurechnung im Unternehmen vorgestellt. Im Folgenden wird erläutert, wovon Produktkosten abhängen und wie diese maßgeblich in der frühen Phase der Produktentstehung durch den Entwickler beeinflusst werden können.

**Anforderungen** An erster Stelle der kostenbeeinflussenden Parameter müssen hier die Anforderungen genannt werden. Diese werden im Rahmen der Entwicklung des zukünftigen Produktes als erstes erfasst und bilden die Grundlage für die notwendigen Produktfunktionen und deren Lösungskonzepte. Das Sammeln und Aufbereiten der Anforderungen muss auf Basis einer strukturierten Vorgehensweise erfolgen. Daher bietet sich eine Klassifizierung der Fragen zur Erstellung der Anforderungsliste an. Dies kann nach den in Abb. 3.90 aufgeführten Schwerpunkten nach Ehrlein Spiel et al. (2007) erfolgen. Die Anforderungsliste sollte somit zu einem möglichst frühen Zeitpunkt alle Anforderungen und Wünsche an das zukünftige Produkt enthalten und zwar aus Sicht des potenziellen Kunden, aber



**Abb. 3.90** Schwerpunkte für die Ermittlung von Anforderungen (Ehrlenspiel et al. 2007)

auch aus Sicht von Produktion, Vertrieb, Service usw. Die Liste – das Lastenheft – beschreibt somit, *was* erfüllt werden muss. Das *wie* wird später im Entwicklungsprozess im sog. Pflichtenheft festgelegt.

Die Klassifizierung der Anforderungen kann z. B. in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen erfolgen. Dies ist zielführend, wenn es um die Optimierung der Produktarchitektur geht (s. Kap. 4.5). Ein Beispiel für eine funktionale Kundenanforderung an einen Pkw wäre der Wunsch, allzeit die Vorgänge im Straßenverkehr auch bei schlechten Witterungsverhältnissen vom Fahrerplatz aus gut einsehen zu können. Nicht funktionale Anforderungen sind z. B. Wünsche nach einer bestimmten Lackfarbe, um beim Beispiel Pkw zu bleiben.

**Funktionen und Lösungskonzepte** Vom Entwickler werden diese Anforderungen im laufenden Entwicklungsprozess in Funktionen und Lösungskonzepte übersetzt. Das gewählte Beispiel der Kundenanforderung wird in die Funktion „Sicht auf Straße sicherstellen“ übersetzt. Diese Funktion kann durch recht unterschiedliche Konzepte realisiert werden, die großen Einfluss auf die Herstellkosten haben. Klassischerweise wird als Lösungskonzept in der Pkw-Entwicklung eine Windschutzscheibe ergänzt um zwei Scheibenwischer verwendet. Dieses Lösungskonzept könnte z. B. weiter um eine sog. Nanobeschichtung der Scheibe und einen geschwindigkeitsabhängigen Anpressdruck des Scheibenwischers ergänzt werden, wodurch die Funktion das Schmutzabweisungs- und Schmutzentfernungsverhalten deutlich verbessern würde. Ein weiteres, noch aufwändigeres Lösungskonzept wäre die Unterstützung der obigen Funktion durch ein Nachtsichtgerät inklusive eines Displays. Hierzu wird die Straße mit Infrarotlicht beleuchtet, die reflektierten Anteile werden von einer Kamera erfasst und ein digitales Bild der Verkehrssituation auf einem Display dargestellt. Dieses Beispiel zeigt deutlich, wie stark das gewählte Lösungskonzept zur Erfüllung der Anforderungen die Produktkosten beeinflusst.

**Werkstoffe und Abmessungen** Ist das Lösungskonzept festgelegt, so ist die konkrete Realisierung zumeist vom verwendeten Werkstoff abhängig. So kann z. B. eine einfache Halterung, die als kraftaufnehmendes Element dient, als integrales Gussteil oder als Schweißkonstruktion ausgeführt werden. Um die Vorteile des gewählten Werkstoffs voll ausnutzen zu können und die werkstoffabhängigen spezifischen Fertigungsverfahren zu berücksichtigen, muss mit der Konstruktion auch der Werkstoff festgelegt werden. So sollte die Gusskonstruktion so optimiert werden, dass vor allem Druckkräfte und resultierende Druckspannung in der Halterung auftreten. Die Gusskonstruktion bietet darüber hinaus noch die Möglichkeit, kostengünstig weitere Elemente wie die Fixierung eines Kabels und Bohrungen oder Langlöcher vorzusehen. Für die Verwendung einer Schweißkonstruktion aus Stahl ist u. U. der Einsatz hochfester Stähle wichtig, um die auftretenden Kräfte beherrschen zu können. Ebenfalls müssen Stückzahleffekte berücksichtigt werden, so dass bei kleinen Stückzahlen sicherlich eine Schweißkonstruktion wirtschaftlicher wäre.

Ist das Material festgelegt, so beeinflusst die Qualität des konkreten Werkstoffs, die benötigte Werkstoffmasse und die Materialverfügbarkeit die Kosten. Die Qualität des Werkstoffs

berücksichtigt neben den klassischen Werkstoffkennwerten wie Streckgrenze und Zugfestigkeit auch Eigenschaften wie Korrosionsverhalten und Materialreinheit. Die benötigte Werkstoffmasse liegt häufig deutlich über der Masse des fertigen Werkstücks, so werden z. B. Turbinenlaufräder in kleiner Stückzahl gefräst, und das fertige Laufrad besitzt lediglich ein Fünftel des Gewichts vom benötigten Rohling. Ebenfalls relevant für die Kosten ist die lokale Verfügbarkeit des Werkstoffs bzw. der Legierung, so kommen in der US-amerikanischen Automobilindustrie beispielsweise andere Alulegierungen zum Einsatz als in Europa. Wollte man in Europa die zwar geringere Qualität der US-Legierungen einsetzen, so wären diese dennoch teurer als die europäischen Standardlegierungen.

Um eine pragmatische Kostenabschätzung trotz der vielen Einflussparameter durchführen zu können, hat sich der Ansatz mit sog. Brutto-Werkstoffkosten in der Praxis bewährt. Die Brutto-Werkstoffkosten  $W_b$  werden mit der nachfolgenden Formel berechnet, siehe auch Kurz et al. (2009).

$$W_b = V_b \cdot k_v^* \cdot k_{vo} \quad (3.1)$$

Hierin ist  $V_b$  das benötigte Bruttovolumen des Werkstoffs,  $k_v^*$  sind die relativen Werkstoffkosten, die auch Abmessungskategorien (klein, mittel, groß) berücksichtigen, und  $k_{vo}$  sind die spezifischen Werkstoffkosten eines Basiswerkstoffs. Obwohl sich der absolute Preis für den Werkstoff in wenigen Tagen um 20 % und mehr ändern kann, bietet die Gl. (3.1) dennoch eine akzeptable Genauigkeit. Der Grund hierfür ist, dass die relativen Werkstoffkosten  $k_v^*$ , d. h. um wie viel ein bestimmter Werkstoff teurer ist als der Referenzwerkstoff, auch über eine längere Zeitdauer konstant bleiben. Tabellarische Werte sind (VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2 1998) zu entnehmen und der Preis für den Referenzwerkstoff kann tagesaktuell beim Hersteller erfragt werden.

**Beispiel** Als Basis für die spezifischen Werkstoffkosten  $k_{vo}$  in den Tabellenwerken (VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2 1998) dient der warmgewalzte Rundstahl S235JRG1 (Werkstoffnummer 1,0036), der im Maschinenbau bei mäßiger Beanspruchung und guter Schweißbarkeit standardmäßig eingesetzt wird. Als Einflussfaktor ebenfalls wichtig sind eine mittlere Standardgeometrie mit einem Durchmesser von 35–100 mm und die Bezugsmenge von 1.000 kg. Abweichungen hiervon, wie z. B. Kleinmengenzuschläge, müssen in Gl. (3.1) gesondert berücksichtigt werden. Es soll ein Dreiteil aus 16MnCr5 mit einem Nettovolumen von 1,5 dm<sup>3</sup> errechnet werden. Das zerspannte Werkstoffvolumen beträgt 20 %.

Das Bruttovolumen errechnet sich somit aus dem Nettovolumen multipliziert mit dem zerspannten Werkstoffvolumen. Somit ergibt sich für  $V_b = 1,5 \text{ dm}^3 \times 1,2 = 1,8 \text{ dm}^3$ .

Zur Ermittlung von  $k_v^*$  werden Tabellenwerte mit technischen und wirtschaftlichen Kenngrößen zur Werkstoffwahl herangezogen. Nach VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2 (1998) ergibt sich für Bauteile mit einer mittleren Abmessung  $k_v^* = 1,7$  und  $k_{vo} = 7,22 \times 10^{-3} \text{ € je cm}^3$ . Für kleine Abmessungen (Durchmesser 6 mm) wäre  $k_v^* = 3,0$  und für große Abmessungen (Durchmesser zwischen 160 und 200 mm) wäre  $k_v^* = 1,8$ . Die Werkstoffkosten nach Gl. (3.1) betragen somit:

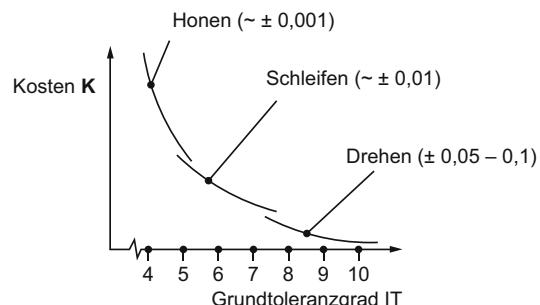
$$W_b = 1.800 \text{ cm}^3 \cdot 1,7 \cdot 7,22 \cdot 10^{-3} \text{ €/cm}^3 = 22,09 \text{ €}$$

**Schwierigkeitsgrad von Guss- und Schmiedestücken** Neben dem Gewicht ist auch die Geometrie vor allem von Guss-, Druckguss- und Gesenkschmiedestücken ein wichtiger Parameter, der die Produktkosten stark beeinflusst. Die Geometrie kann nach (VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2 1998) ebenfalls über die relativen Werkstoffkosten  $k_v^*$  berücksichtigt werden. Hierin fließen dann Stückgewicht, Gussart sowie der Schwierigkeitsgrad (z. B. mit/ohne Kern, Aussparungen oder Rippen) bei vorgegebener Stückzahl ein. Die gleichen Ansätze gelten auch für Gesenkschmiedestücke, bei denen die relativen Werkstoffkosten  $k_v^*$  aus einer Vielzahl von untersuchten Einzelfällen ermittelt wurden. Diese Mittelwertbildung schränkt die unmittelbare Anwendbarkeit jedoch ein, so dass eine Kostenkalkulation allein auf dieser Basis nicht durchgeführt werden sollte.

**Toleranzen** Toleranzen sind die gegenüber einem vorgegebenen Nennmaß zulässigen Abweichungen. Diese werden z. B. in verschiedenen DIN und ISO-Richtlinien festgelegt (z. B. DIN 7154, DIN 7155 und ISO 286). Hierin sind die sog. Toleranzklassen und Toleranzfelder beschrieben, welche das Maß für die jeweils zulässige Abweichung angeben. Die Einhaltung von kleinen Toleranzen bedingt u. U. in der Fertigung zusätzliche Fertigungsvorgänge (z. B. nach dem Bohren – im allgemeinen Toleranzfeld H12, ein anschließendes Reiben – im allgemeinen Toleranzfeld H7) oder grundsätzlich andere und aufwändigere Fertigungsverfahren (z. B. Fräsen statt Feinguss). So gilt als oberste Maxime „so grob wie möglich, so fein wie nötig“. In der Zerspanungstechnik gilt darüber hinaus, dass eine Halbierung der Toleranz in etwa zu einer Vervierfachung der Fertigungskosten führt. Des Weiteren muss die Fertigungsgenauigkeit für ein Werkzeug zwei bis drei Toleranzklassen genauer sein, als für das darauf zu fertigende Werkstück, z. B. Werkstück H7 und Werkzeug H4 oder H5. Bei Präzisionswerkstücken können dies sogar bis zu fünf Toleranzklassen sein (Stare und Meyer 2004). Neben diesen Grundsätzen gilt in der Praxis, dass sich die Kosten mit der Einhaltung von kleineren Toleranzen jeweils sprunghaft aufgrund eines Wechsels bzw. eines zusätzlichen Fertigungsverfahrens ändern. Dies ist in Abb. 3.91 nach Klein (2006) schematisch dargestellt.

In bestimmten Toleranzbereichen ist es daher möglich, dass sich die Kosten praktisch kaum durch eine Toleranzänderung verändern. So wird beim Bohren mit Spiralbohrer in der Regel ein Toleranzfeld H12, evtl. sogar H11 erreicht. Würde man jedoch nur H14 vorschreiben, würden die Kosten kaum fallen.

**Abb. 3.91** Einfluss des Fertigungsverfahrens auf Toleranzen und Kosten (Klein 2006)



d/ [mm]	Werkstoff	Blechdicke		2 mm		Blechdicke		3 - 6 mm	
		H14	H11	H9	H7	H14	H11	H9	H7
5	Al	4	L	3,5	LAR	1,2 B	1,7 BA	3 BR	4 BAR
	St, Ms			3,5	LAR	1,5 B	2 BA	3,5 BR	4,5 BAR
	CrNi	1,6 B	2 BA	4 LAR	4,5 LAR	2 B	3 BA	5,5 BAR	6 BAR
16	Al	1	L	3,5 LAR	4 LAR	3,5	BA	6 BAR	6,5 BAR
	St, Ms			4 LAR	4,5 LAR	5,5	BA	8 BAR	8,5 BAR
	CrNi	4 B	5,5 BA	7,5 LAR	8 BAR	7,5	BA	10 BAR	10,5 BAR
Abk.:		A = Aufbohren		B = Bohren		L = Lochen		R = Reiben	

**Abb. 3.92** Relativkosten abhängig von Material, Fertigungsverfahren und Fertigungstoleranzen

Für die Kalkulation der Kosten empfiehlt es sich, wieder mit dem Ansatz der Relativkosten, bezogen auf ein sehr einfaches Fertigungsverfahren, wie z. B. das Lochen, zu arbeiten.

Abbildung 3.92 nach Klein (2006) zeigt die anfallenden Relativkosten bei der Bearbeitung von unterschiedlich starken Blechen (2 sowie 3–6 mm) für die Fertigungsverfahren Aufbohren, Bohren, Lochen und Reiben. Da die Materialkosten hierbei nicht einfließen, können Stahl und Messing (Ms) gemeinsam betrachtet werden. Am kostengünstigsten ist das Lochen von Aluminiumblechen mit einem Kostenfaktor 1 und einem erzielbaren Toleranzfeld H11. Soll eine Toleranz H9 erreicht werden, so bedingt dies weitere Fertigungsschritte nach dem Lochen wie Aufbohren und Reiben. Die Kosten würden um das 3,5-Fache gegenüber dem reinen Lochen ansteigen. Chromnickelstahl (CrNi) lässt sich bei den hier betrachteten Maschinen nicht lochen, sondern muss gebohrt werden. Ebenso Bleche mit einer Materialstärke von mehr als 3 mm. Würde ein Unternehmen mit anderen Maschinen betrachtet, so würden sich auch andere Relativkosten ergeben.

**Stückzahl** Die starke Abhängigkeit der Produktkosten von der Stückzahl ist der Hauptgrund für die Fertigung von Produkten in Großserien. Häufig lohnen sich erst ab einer bestimmten Stückzahl bestimmte Fertigungseinrichtungen wie Schweißroboter oder Fertigungsverfahren, wie z. B. das Gießen von Bauteilen. So sind vor allem bei kleinen Stückzahlen die einmalig auftretenden Kosten sehr wichtig, die alle bei der Entwicklung und Produktion des Produktes anfallenden Umfänge berücksichtigen. Hierzu gehören beispielsweise Marktanalyse, Konstruktion, Berechnung, Versuch und Werkzeugerstellung. Mit der sog. Stückzahldegression wird der Effekt beschrieben, dass die Stückkosten mit zunehmender Stückzahl zumeist sinken. Ursachen hierfür sind die Aufteilung der einmaligen Kosten auf eine größere Stückzahl. Wird z. B. die Festigkeitsberechnung für eine Halterung während der Entwicklung einmalig durchgeführt, so muss bei einer großen Stückzahl das einzelne Endprodukt eine geringere Umlage tragen, als bei kleiner Stückzahl.

Ein weiterer Effekt sind Rabatte des Lieferanten bei der Abnahme größerer Mengen. So gilt als grobe Regel, dass bei einer Verdoppelung der Menge, der Rabatt 10–30 % beträgt. Dieser pauschale Ansatz wird jedoch von einer Vielzahl von weiteren Rahmenbedingungen, wie z. B. strategischer Bedeutung des Kunden, aktuelle Markt- und Fertigungssituation oder Zahlungsbedingungen, beeinflusst.

Des Weiteren können bei höheren Stückzahlen andere Fertigungsverfahren eingesetzt werden. So werden, falls dies aus konstruktiver Sicht möglich ist, in einer Großserie Bauteile gegossen. Bei einer kleinen Stückzahl sind Gusswerkzeuge jedoch nicht lohnend und das Bauteil wird evtl. aus einzelnen Blechen geschweißt. Der gleiche Leitgedanke gilt auch für die Entwicklung, so dass eine aufwändigere Entwicklungsarbeit u. U. zu einem Bauteil führen kann, das kostengünstiger hergestellt werden kann.

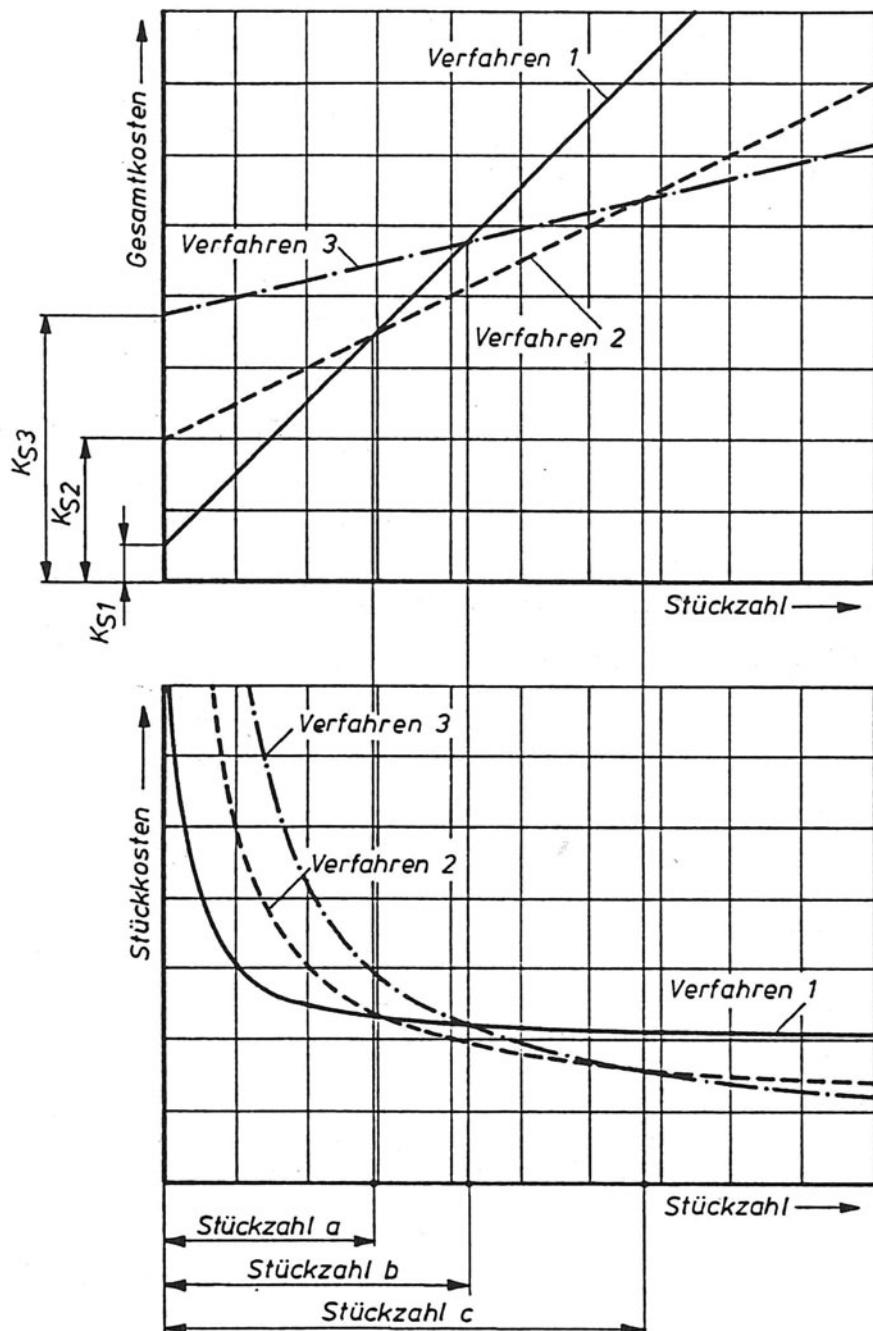
Durch einen Trainingseffekt kann es ebenso zu einer Reduktion der Kosten kommen, wenn sich komplexe Vorgänge z. B. in einer Montage häufiger wiederholen und durch Erfahrung schneller sowie mit höherer Ausführungsqualität durchgeführt werden.

Eine höhere Stückzahl muss jedoch nicht zwangsläufig zu einer Reduktion der Stückkosten führen, vor allem dann nicht, wenn sich die Stückzahl nach der Planung der Fertigungsanlagen erhöht. Gründe hierfür liegen in den sprungfixen Parametern. So wird für eine geplante Stückzahl die benötigte Anzahl an Produktionslinien sowie u. U. ein passendes Gebäude inkl. Infrastruktur geplant und gebaut. Wird die Stückzahl über die maximale Auslastungsgrenze hinaus erhöht, ist eine weitere Produktionslinie notwendig, die räumlich evtl. nicht in das gleiche Gebäude passt. Die zusätzlichen Kosten für Montagelinie und Gebäude werden durch die erhöhte Stückzahl nicht kompensiert bzw. die Stückkosten erhöhen sich.

Die Abhängigkeiten von Stückzahlen können nach Kurz et al. (2009) in drei unterschiedliche Verfahren klassifiziert werden. Im oberen Teil von Abb. 3.93 sind die Gesamtkosten für ein Produkt über der Stückzahl aufgetragen. Verfahren 1 hat niedrige Einmalkosten z. B. für Entwicklung, Werkzeugerstellung und Messwerkzeuge. Jedoch sind die Stückkosten deutlich höher als bei Verfahren 2 und 3. Verfahren 2 hat jedoch höhere Einmalkosten und Verfahren 3 die höchsten Einmalkosten. Eine typische industrielle Anwendung für Verfahren 1 wäre das Elektrodenschweißen von Hand von Blechkonsolen, für Verfahren 2 die Fertigung dieses Bauteils aus einem Rohling mittels CNC-Fräsmaschine und für Verfahren 3 die Fertigung mittels Guss.

Im unteren Teil von Abb. 3.93 sind die Stückkosten über der Stückzahl aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass bis zu einer Stückzahl  $a$  Verfahren 1 am günstigsten ist und bei einer Stückzahl größer  $c$  Verfahren 3. Bei mittleren Stückzahlen würde aus reinen Kostengesichtspunkten Verfahren 2 gewählt werden.

Der hier beschriebene Effekt ist die Grundlage für die Kostenreduktion bei Einsatz sog. Plattform- und Baukastenkonzepte. Bei diesen wird (s. Kap. 4.5) eine Komponente in mehreren Endprodukten des Portfolios eingesetzt. So kann als Beispiel A der Elektromotor eines Fensterhebers für unterschiedliche Fahrzeuge verwendet werden. Einmalaufwände wie z. B. für die Konstruktion werden auf größere Stückzahlen verteilt. Falls eine direkte Übernahme einer solchen Komponente in andere Endprodukte nicht möglich ist, können



**Abb. 3.93** Darstellung der Gesamtkosten als Funktion von Einmalkosten und Stückzahl (nach Kurz et al. 2009)

u. U. kostengünstig Varianten hiervon abgeleitet werden. Der Elektromotor aus Beispiel A muss evtl. unterschiedlichen Leistungsanforderungen genügen. Konzeptionell bliebe er unverändert, jedoch würde die Anzahl der Wicklungen erhöht. Die Konstruktion hätte kleine Änderungsumfänge, und die Fertigung könnte auf der gleichen Linie erfolgen.

### 3.7.4 Produktkosten im Entwicklungsprozess

**Festlegung der Zielkosten: Target Costing** Target Costing ist ein strategisches Instrument des Kostenmanagements, mit dem Ziel marktgerechte Produkte hinsichtlich Kosten und Leistungsmerkmalen zu entwickeln und zu fertigen. Damit gehört es zu den grundlegenden Werkzeugen der Produktentwicklung. Die Grundlage für die Preisgestaltung der Produkte sind heutzutage nicht mehr die sich ergebenden Selbstkosten zuzüglich eines Zielgewinns aus Sicht des Unternehmens (Verkäufermarkt), sondern die vom Markt erlaubten Preise unter Berücksichtigung der kundenrelevanten Leistungsmerkmale.

Die Vorgehensweise des Target Costing lässt sich in drei Phasen abgrenzen (Götze 2010). Vorgelagert ist u. U. eine Phase, in der eine erste Konzeptausarbeitung des Produktes stattfindet.

1. Zielkostenfindung: Ermittlung bzw. Prognose des möglichen Zielpreises (target price) im Rahmen von Marktforschungsaktivitäten, wie z. B. einer Conjoint-Analyse. Der geplante Gewinn des Unternehmens (target margin) für den Verkauf des betrachteten Produktes wird vom möglichen Zielpreis abgezogen und ergibt die am Markt durchsetzbaren erlaubten Kosten (allowable costs).
2. Zielkostenspaltung: Die Zielkosten des Produktes müssen auf Baugruppen, Komponenten und Funktionen heruntergebrochen werden, um als konkrete Entwicklungsziele Verwendung zu finden.
3. Zielkostenerreichung: Die erfolgreiche Erreichung der Zielkosten setzt voraus, dass die erforderlichen Methoden und Instrumente für das Erkennen von Kostenpotenzialen eingesetzt werden (können) und die abgeleiteten Maßnahmen umgesetzt werden (können).

Die Vorgehensweise des Target Costing wird im Folgenden detailliert beschrieben und exemplarisch anhand einer zu entwickelnden Kettensäge verdeutlicht.

1. Zielkostenfindung: Zielpreise können durch fünf Ansätze ermittelt werden. Beim Ansatz „market into company“ wird der Zielpreis ausschließlich anhand von Markterfordernissen ermittelt. Diese Methode wird von Unternehmen mit starker Kundeninteraktion (Direktvertrieb), geringem bis mittlerem Komplexitätgrad und kleinen Innovationssprüngen, wie z. B. bei Staubsaugern oder Elektrowerkzeugen, eingesetzt. Der Ansatz „out of company“ ist für marktbeherrschende Unternehmen gebräuchlich, wobei für die Ableitung des Zielpreises interne technische und betriebswirtschaftliche Potenziale

**Tab. 3.2** Bedeutung der Produktmerkmale aus Sicht des Kunden

	Schnittgeschwindigkeit	Geräusch	Design	Verbrauch
	45 %	20 %	20 %	15 %

ausschlaggebend sind. „*Into and out of company*“ ist eine Kombination dieser beiden Ansätze. Da diese Methode mit großem Abstimmungsaufwand verbunden ist, wird sie in der Praxis kaum eingesetzt. Beim Ansatz „*out of competitor*“ werden Wettbewerbsprodukte und -preise zur Zielfindung herangezogen. Ein erfolgreiches Abheben gegenüber dem Wettbewerb ist hiermit jedoch schwer erreichbar. Der Ansatz „*out of optimal costs*“ geht von den unternehmensinternen Rahmenbedingungen aus, unter Berücksichtigung z. B. optimaler Strukturen. Wird dann der geplante Gewinn des Unternehmens vom Zielpreis abgezogen, erhält man die erlaubten Kosten. Diese müssen u. U. aufgrund noch nicht berücksichtigter Einflussfaktoren korrigiert werden, und man erhält als Ergebnis die eigentlichen Zielkosten (target costs). Die ermittelten Zielkosten für das Gesamtprodukt sind jedoch für die Produktentwicklung einerseits zu pauschal und berücksichtigen andererseits Gemeinkosten, die nicht in Verbindung mit der Erfüllung der Produktfunktion stehen. Diese Gemeinkosten wie z. B. Kosten für Unternehmensleitung und Marketing werden abgezogen und die verbleibenden Kosten als Zielwerte auf einzelne Baugruppen, Komponenten und Funktionen heruntergebrochen. Im gewählten Beispiel wird prognostiziert, dass ein Kunde bereit ist, 400 GE (Geldeinheiten) für eine Kettensäge mit den zugesagten Funktionsmerkmalen zu bezahlen. Des Weiteren wird angenommen, dass über den Lebenszyklus anteilige Gemeinkosten von 35 GE berücksichtigt werden müssen, die nicht mit der Erfüllung der Funktionen der Kettensäge zusammenhängen. Ein angestrebter Gewinn von 65 GE soll zugrunde gelegt werden. Die sich ergebenden Zielkosten betragen somit 300 GE und gehen als Eingangsgröße in die Zielkostenspaltung.

- Zielkostenspaltung: In der Zielkostenspaltung werden Ziele für einzelne Komponenten, Baugruppen und Funktionen ermittelt. Hierzu muss z. B. im Rahmen einer Kundenbefragung die Bedeutung einzelner Produktmerkmale oder -funktionen wie Schnittgeschwindigkeit, Geräusch, Design und Verbrauch der Motorsäge ermittelt werden, s. Tab. 3.2.

Im Folgenden wird der Einfachheit halber der Begriff Komponente für die Umfänge Motor, Kette, Gehäuse und Elektronik verwendet. Nun werden die Beiträge der einzelnen Komponenten zur Erfüllung der Produktfunktionen ermittelt, s. Tab. 3.3.

Daraus lassen sich nun die Zielwerte für die einzelnen Komponenten ableiten, s. Tab. 3.4. In einem weiteren Schritt, der hier nicht näher erläutert wird, könnten die Kosten noch weiter heruntergebrochen werden, z. B. beim Motor auf Einspritzsystem, Verbrennungssystem und Abgassystem.

- Zielkostenerreichung: Die erfolgreiche Erreichung der Zielkosten setzt voraus, dass die erforderlichen Methoden und Instrumente für die Erkennung von Kostenpotenzialen eingesetzt werden (können) und die abgeleiteten Maßnahmen umgesetzt werden (können).

**Tab. 3.3** Beitrag der vier Komponenten zur Funktionserfüllung des Produkts

Funktion	Schnittgeschwindigkeit (%)	Geräusch (%)	Design (%)	Verbrauch (%)
<i>Komponente</i>				
Motor	20	85	9	77
Kette	75	12	3	8
Gehäuse	0	0	85	0
Elektronik	5	3	3	15

**Tab. 3.4** Zielkosten der Komponenten abhängig von der Funktionserfüllung

Funktion	Schnittgeschwin- digkeit (%)	Geräusch (%)	Design (%)	Verbrauch (%)	Zielwerte GE
<i>Komponente</i>					
Motor	20	85	9	77	104,00
Kette	75	12	3	8	71,50
Gehäuse	0	0	85	0	67,50
Elektronik	5	3	3	15	57,00

**Tab. 3.5** Nutzenanteil je Komponenten

Funktion	Schnittgeschwin- digkeit 45 (%)	Geräusch 20 (%)	Design 20 (%)	Verbrauch 15 (%)	Nutzenanteil (%)
<i>Komponente</i>					
Motor	9	17	2	12	39
Kette	34	2	1	1	38
Gehäuse	0	0	17	0	17
Elektronik	2	1	1	2	6

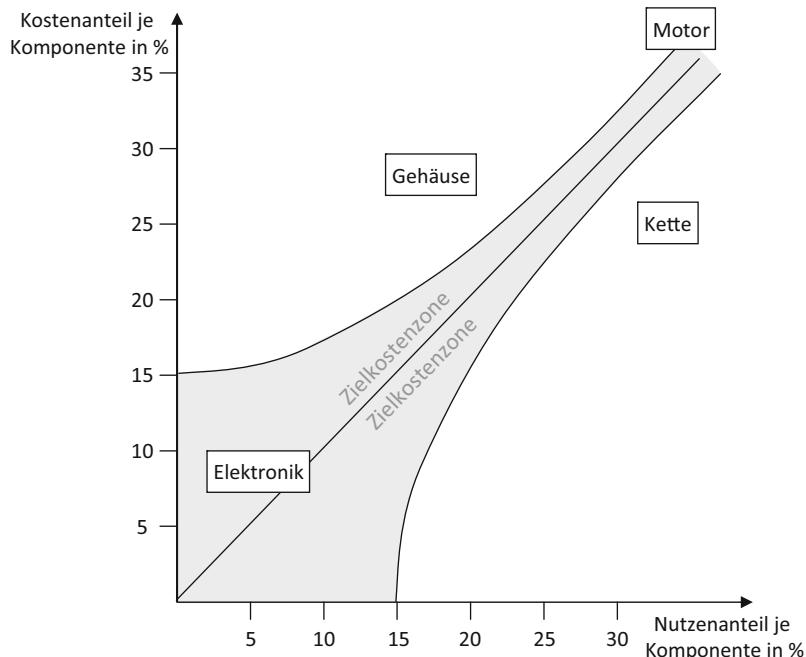
nen). Hierzu wird im Rahmen des Target Costing überprüft, welchen Nutzenanteil die Komponenten besitzen, s. Tab. 3.5. Dies erfolgt durch Multiplikation der Bedeutung der Produktmerkmale bzw. -funktionen (Tab. 3.2) und dem Beitrag zur Funktionserfüllung pro Komponente (Tab. 3.3).

Anschließend wird überprüft wie das Verhältnis aus Nutzenanteil (Sicht des Kunden) zum Anteil an den zukünftigen Standardkosten pro Komponente aussieht. Diese Größe wird als Zielkostenindex bezeichnet und ist ein Maß für den Optimierungsbedarf aus Sicht des Entwicklers. In Tab. 3.6 sind Werte für die Standardkosten der Komponenten angenommen.

Der Kostenreduktionsbedarf gibt die Differenz zwischen Standardkosten und Zielkosten in GE an. Der Anteil der Standardkosten pro Komponente bezieht sich auf die Standardkosten des Gesamtprodukts. Der Zielkostenindex bezieht den Nutzen auf den Aufwand, d. h. den Nutzenanteil auf den Anteil an den Standardkosten. Für einen Zielkostenindex deutlich kleiner 1, wie beispielsweise für Gehäuse und Elektronik, ist daher

**Tab. 3.6** Ableitung des Zielkostenindex je Komponente

Bewertungsgröße	Zielkosten GE	Standardkosten GE	Kostenreduktionsbedarf	Anteil an Standardkosten (%)	Zielkostenindex
<i>Komponente</i>					
Motor	118,05	120,00	1,95	40	0,98
Kette	113,85	70,00	-43,85	23	1,63
Gehäuse	51,00	85,00	34,00	28	0,60
Elektronik	17,10	25,00	7,90	8	0,68

**Abb. 3.94** Zielkostenkontrolldiagramm

der Kostenanteil im Vergleich zum Nutzenanteil zu groß, d. h., die Konstruktion zu teuer. Der Kunde honoriert die Funktion in einem geringeren Maß als aufgrund des korrespondierenden Kostenanteils zu erwarten wäre. Ist der Zielkostenindex größer als 1, so ist die Komponente zu einfach. Es sollte untersucht werden, ob die Kundenerwartungen vom geplanten Konzept tatsächlich vollständig erfüllt werden.

Eine grafische Darstellung dieser Ergebnisse erfolgt klassischerweise im sog. Zielkostenkontrolldiagramm, s. Abb. 3.94. In diesem wird für jede Komponente bzw. Baugruppe der Kostenanteil über dem Nutzenanteil aufgetragen.

Ober- und unterhalb der Winkelhalbierenden erstreckt sich ein Bereich, der als Zielkostenzone bezeichnet wird. Diese lässt für Komponenten mit geringem Kosten- und Nutzenanteil

(10–15 %, im Beispiel: Elektronik) eine größere Abweichung zu, da vor allem eine Konzentration auf die Hauptkostentreiber und -funktionen (im Beispiel: vor allem Motoren) zu erfolgen hat. Abhängig vom Unternehmen und dem jeweiligen Produkt sowie teilweise auch vom Projektstatus, wird die Zielkostenzone verbindlich festgelegt.

Die Ausführungen zeigen, dass der große Vorteil des Target Costing in der Einbeziehung von Kundenwünschen, der Ableitung entsprechender Produktfunktionen und Preisvorstellungen des Kunden liegt. Somit kann als Ergebnis ein marktgerechtes Produkt entwickelt werden. Des Weiteren stellen die Zielkosten eine wichtige Planungs- und Kontrollgröße dar. Nur wenn jeder am Wertschöpfungsprozess Beteiligte den Kostensenkungsdruck transparent nachvollziehen kann, ist die Realisierung auch anspruchsvoller Kostenziele überhaupt möglich. Allerdings berücksichtigt das Target Costing nicht Rahmenbedingungen der Produktentwicklung, wie z. B. Materialpreise, Fertigungstechnologien oder Standortspezifika, aus denen sich Kostennachteile, teilweise aber auch Vorteile ergeben können.

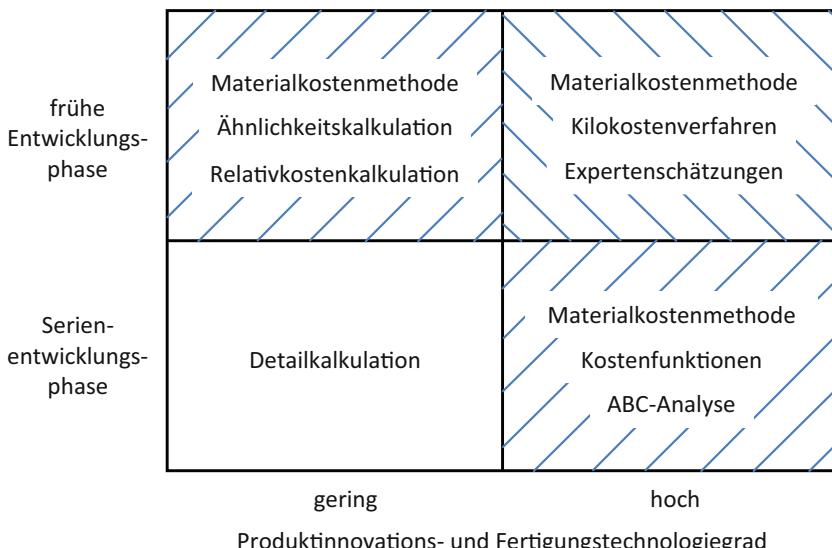
**Methoden zur Kostenzielerreichung: Design-to-Cost** Design-to-Cost setzt an den Ergebnissen des Target Costing an, d. h. ermittelte Zielwerte für die Produktkosten durch entsprechende Maßnahmen zu erreichen. Somit wird bereits während der Entwurfs- und Konstruktionsphase überprüft, ob mit dem geplanten Konzept die Kostenziele erreichbar sind. Falls nein, so muss für die Funktionsrealisierung ein anderes kostengünstigeres Lösungskonzept erarbeitet werden. Neben den klassischen Funktions-, Qualitäts- und Terminzielen der Entwicklung werden mit der Design-to-Cost-Methode auch Kostenziele zu einem wichtigen Vorgabeparameter.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, bereits in der Konzeptphase auf Basis von wenigen Informationen, belastbare Kostenprognosen zu erstellen. Da die verfügbaren Informationen über das zukünftige Produkt von der Konzeptphase zur Serientwicklungsphase ansteigen, haben sich hierfür unterschiedliche Schätz- bzw. Kalkulationsmethoden entwickelt. Außerdem wird die mögliche Genauigkeit der Kostenprognosen von den geplanten Produktinnovationen sowie vom Detailwissen über die geplanten Fertigungstechnologien beeinflusst. Somit sind die Kosten bei Einsatz neuer eher unbekannter Produkttechnologien mit geringerer Genauigkeit abschätzbar, als bei bekannten etablierten Technologien. Eine Auswahl an Schätz- und Kalkulationsmethoden ist in Abb. 3.95 dargestellt.

Die Materialkostenmethode kann eingesetzt werden, wenn das Verhältnis von Material- zu Fertigungskosten konstant ist. Die Materialkosten für ein neues Produkt würden damit in einem ersten Schritt z. B. durch den Einkauf des Unternehmens auf Basis von Stücklisten ermittelt und auf dieser Basis die neuen Herstellkosten  $HK_{neu}$ , analog Gl. (3.2) berechnet. Weitere Größen hierin sind die neuen Materialkosten und die Materialkosten des bekannten Produktes  $MK_{neu}$  und  $MK_{alt}$  sowie die Herstellkosten des bekannten Produktes  $HK_{alt}$ .

$$HK_{neu} = \frac{HK_{neu}}{MK_{alt}} HK_{alt} \quad (3.2)$$

Beim Kilokostenverfahren wird als maßgebliche kostenbeeinflussende Größe das Gewicht verwendet. Prinzipiell sind auch andere Einflussgrößen wie z. B. das Volumen oder die



**Abb. 3.95** Zuordnung von Kalkulations- und Schätzverfahrenen. (In Anlehnung an Neff 2002)

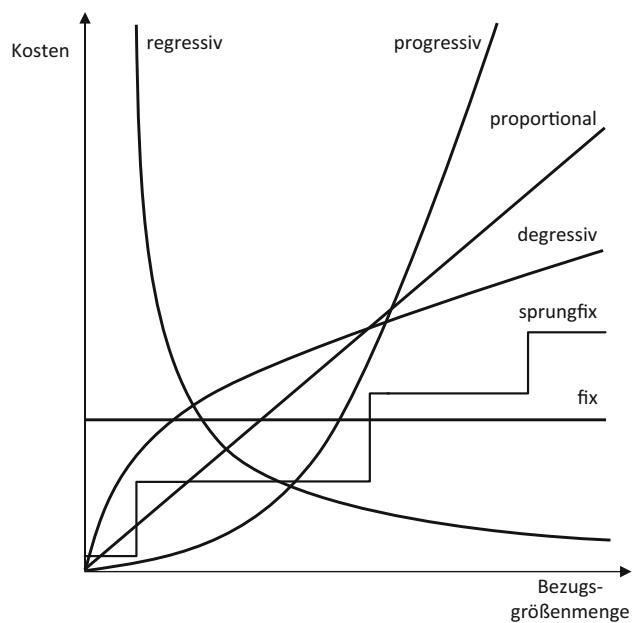
Anzahl der Bauteile einsetzbar, falls diese mit den Herstellkosten  $HK$  linear korrelieren. Die Herstellkosten für das neue Produkt  $HK_{neu}$  ergeben sich somit analog Gl. (3.3), z. B. nach Ehr lenspiel et al. (2007) mit dem Gewicht des neuen bzw. alten Produktes  $Gewicht_{neu}$  und  $Gewicht_{alt}$ .

$$HK_{neu} = \frac{Gewicht_{neu}}{Gewicht_{alt}} HK_{alt} \quad (3.3)$$

Bei Expertenschätzungen sollten mehrere Experten aus Konstruktion, Fertigung und Einkauf zuerst unabhängig voneinander die Herstellkosten schätzen. Durch das getrennte Schätzen kann sichergestellt werden, dass keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet. Des Weiteren empfiehlt es sich, das zu schätzende Produkt vorab in seine Baugruppen zu zerlegen und diese separat schätzen zu lassen. Im Nachgang werden nun allen Experten gemeinsam die Kostenschätzungen vorgestellt. Im Rahmen dieser gemeinsamen Diskussion treten u. U. noch weitere kostenbeeinflussende Aspekte hervor, die das Schätzergebnis nochmals verbessern.

Sind Kosten während der frühen Entwicklungsphase zu prognostizieren und es kommen bekannte Fertigungstechnologien zum Einsatz, können neben der Materialkostenmethode auch die Ähnlichkeitskalkulation bzw. Relativkostenkalkulation durchgeführt werden. Die Ähnlichkeitskalkulation ist eine häufig angewandte und prinzipiell einfache Methode. Als Eingangsvoraussetzung müssen jedoch die Ähnlichkeitsparameter bekannter Produkte identifiziert sein und diese Parameter als Selektionskriterium in den Datensätzen des Unternehmens vorliegen. Hierzu gibt es mittlerweile entsprechende Programme, die die Selektion und Suche vereinfachen. Häufig genutzt werden geometrische Abmessungen mit

**Abb. 3.96** Kostenverläufe als Funktion einer Bezugsgrößenmenge



entsprechendem Vergrößerungsfaktor. Mit der Relativkostenkalkulation können relative Kosten von Werkstoffen, Halbzeugen und Zukaufteilen berücksichtigt werden. Hierzu wird eine Bezugsgröße, wie z. B. das Material oder das Fertigungsverfahren, mit einem Faktor für den spezifischen Fall beaufschlagt (siehe auch Einflussfaktoren auf die Produktkosten). In DIN 32991 sind Grundsätze für die Gestaltung von Relativkostenkatalogen erstellt worden. Einschränkend gilt zu erwähnen, dass die Pflege dieser Daten sehr aufwändig und die Anwendbarkeit häufig firmenspezifisch ist.

Sollen im Rahmen der Serienentwicklung Kosten für sehr innovative Produkte prognostiziert werden, so kann auch hier die Materialkostenmethode zum Einsatz kommen. Eine andere Möglichkeit der Kostenermittlung erfolgt über Kostenfunktionen. Hierbei wird die spezifische Abhängigkeit der Kosten von einer Bezugsmengengröße verwendet. Es können sechs grundlegende Kostenfunktionen unterschieden werden, wie teilweise bereits unter „Einfluss auf die Produktkosten“ (Kap. 3.7.3) erwähnt, siehe auch Abb. 3.96.

Bei einem regressiven Zusammenhang nehmen die Kosten bei Erhöhung der Bezugsgrößenmenge rasch ab. Dies gilt z. B. für die Heizkosten von Veranstaltungsräumen bei steigender Besucherzahl. Liegt eine progressive Kostenfunktion vor, so steigen die Kosten stärker an als die Bezugsgrößenmenge, wie bei der Zahlung von Überstundenzuschlägen. Sind die Kosten proportional, dann steigen diese im gleichen Maße wie die Bezugsgrößenmenge. Dies sind etwa die Stromkosten einer Fräsmaschine. Ein degressiver Verlauf liegt vor, wenn Mengenrabatte gewährt werden und somit die Stückkosten bei größerer Mengenabnahme fallen. Sprungfixe Kosten sind häufig in der Fertigung zu beobachten, wenn z. B. eine neue Montagelinie oder eine zusätzliche Montagehalle gebaut werden muss, um

eine höhere Produktionsmenge zu realisieren. Ist keine Abhängigkeit zwischen Kosten und der Bezugsgrößenmenge geben, so sind die Kosten fix.

Bei Anwendung der ABC-Analyse (s. Abb. 3.95) werden Produkt- bzw. Herstellungskosten in drei Kategorien zerlegt. A-Umfänge stellen zwar anzahlmäßig nur ca. 15 % dar, ihr Anteil an den Kosten beträgt jedoch ca. 80 %. Bei den B-Umfängen sind dies ca. 35 % bezogen auf die Anzahl und ca. 15 % bezogen auf die Kosten. Die C-Umfänge haben nur noch einen Kostenanteil von ca. 5 %, stellen jedoch ca. 50 % der Teile oder Fertigungsprozesse dar. Durch die Konzentration auf die A-Umfänge, welche die Kosten maßgeblich beeinflussen, kann mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten somit eine genauere Analyse im Sinne des Gesamtergebnisses erfolgen.

Bei der Detailkalkulation ist dies nicht der Fall, sondern alle Schritte der Wertschöpfung werden detailliert hinsichtlich ihres Kostenbeitrags an den Herstellkosten betrachtet. Voraussetzung hierfür sind genaue Kenntnisse über die Produktinnovationen und die Fertigungstechnologien. Diese Informationen werden im Rahmen der Serienentwicklung erarbeitet. Für die Detailkalkulation wird zumeist eine branchen- oder unternehmensspezifische Software eingesetzt, die sämtliche Operationen der Wertschöpfungskette und damit verbundene Kosten auch anteilmäßig erfasst sowie automatisiert auswertet, z. B. um unterschiedliche Stückzahlszenarien bewerten zu können.

Sind im Rahmen einer Konstruktion oder Produktentwicklung die zukünftigen Kosten ermittelt worden, so müssen in vielen Fällen alternative und kostengünstigere Produktkonzepte entwickelt werden, oder es müssen kostensenkende Maßnahmen identifiziert und auf das geplante Konzept angewandt werden.

**Maßnahmen zur Kostensenkung** Kostensenkungen können erst dann erfolgreich mit Maßnahmen hinterlegt werden, wenn die Kostenpotenziale transparent gemacht werden können. Somit ist es wichtig, aus unterschiedlichen Perspektiven auf den Wertschöpfungsprozess, das konkrete Produkt und die Produktarchitektur zu blicken. Generell gilt, dass in der industriellen Praxis bei hochentwickelten Produkten wie z. B. Fahrzeugen die Kostenpotenziale einzelner Teile zumeist schon ausgeschöpft bzw. gering sind. Bei der Analyse von Komponenten, deren Schnittstellen, Baugruppen, Systemen, dem Gesamtprodukt und vor allem der gesamten Produktarchitektur eines Unternehmens lassen sich jedoch zunehmende Potenziale identifizieren.

Um die Kosten gering zu halten, gelten die grundlegenden Regeln der Konstruktionslehre:

- Geringe Komplexität → einfache und schnelle Fertigungsverfahren,
- kleine Bauteilgröße → geringe Material- und Bearbeitungskosten,
- hohe Stückzahlen → Nutzung von Volumeneffekten und
- geringe Toleranzanforderungen → kostengünstige Fertigung und Qualitätssicherung.

Des Weiteren rücken auch Aspekte wie Nachhaltigkeit immer mehr in den Fokus. Daher sind energiesparsame Fertigungsverfahren zu empfehlen und zwar sowohl aus ökologischen Gründen als auch aufgrund steigender Energiekosten oder Gebühren. Jedoch sollte

bei der Produktentwicklung nicht nur der Energie- und Rohstoffeinsatz im Rahmen der Herstellung berücksichtigt werden, sondern auch die Nutzungsphase durch den Kunden sowie das abschließende Recycling. Diese Überlegungen führen zu folgenden Regeln mit Beispielen:

- Bedarf an Primärenergie vermeiden bzw. gering halten → Druckabfall in Leitungssystemen gering halten, Wärmeverlust vermeiden durch Dämmung,
- Energierückgewinnung → Nutzung von Maschinenabwärme zur Heizung des Verwaltungsgebäudes,
- bedarfsgerechter Energieeinsatz bezüglich Ort, Zeit und Energiewandlung → Einsatz von Laserschweißen, da sehr geringe Wärmeeintragzone und
- Vermeidung von Werkstoffmix bei integrierten Bauteilen → sortenreines Recycling ermöglichen.

Weitere Potenziale zur Senkung der Kosten werden durch die Verwendung von Normteilen, die Einführung von Branchen- oder zumindest Unternehmensstandards sowie die Übernahme von Komponenten und Baugruppen aus anderen Produkten ermöglicht. Diese Maßnahmen stehen nicht im Widerspruch zu kundenindividuellen Produkten, da z. B. durch modulare Baukastensysteme ein Unternehmen dennoch variantenreiche und individuelle Produkte herstellen kann (s. Kap. 4.5).

Mit diesen allgemeinen Regeln können dann gezielte konkrete Maßnahmen erarbeitet werden, wenn die Kostenpotenziale im Wertschöpfungsprozess identifiziert sind.

Um diese Potenziale zu identifizieren, können folgende Methoden eingesetzt werden:

- Benchmarking und Reverse Engineering → Analyse von eigenen und Wettbewerbsprodukten auf der Komponentenebene (z. B. Gewicht, Material, Leistung) und der Beziehungsebene der Komponenten (z. B. Schnittstellen, Funktionen) sowie entsprechenden Prozessen, siehe auch Sabisch und Tintelnot (1998),
- Wertanalyse oder Funktionsstrukturanalyse → Bewertung der Kosten und des zugehörigen Wertes der einzelnen Produktfunktionen aus Kundensicht, siehe auch DIN EN 1325, VDI2800 und VDI2803,
- Produktstrukturanalyse → Analyse des Aufbaus des Produktes (Hard- und Software), seiner Schnittstellen, Standard- und Variantenteile sowie organisatorischer Zusammenhänge, siehe auch Göpfert (1998) und
- Variantenanalyse → Bewertung von Prozesskosten und Erlösanteilen einzelner Varianten, siehe auch Lindemann et al. (2006).

All diese Methoden sind jedoch ineffizient, wenn die Analysedaten nicht transparent visualisiert werden. Hierzu gehört die Darstellung komplexer Zusammenhänge, da z. B. die Wahl eines Fertigungsverfahrens von der Stückzahl abhängig ist, die Stückzahl jedoch vom Standardisierungsgrad des Bauteils bzw. des modularen Baukastens und dies wiederum von den Anforderungen und den realisierten Produktfunktionen.

### 3.7.5 Zusammenfassung

Die kostenoptimale Realisierung von Produkten ist eine der Kernaufgaben von Konstruktoren und Entwicklern. Da in der frühen Phase der Produktentwicklung ca. 70 % der späteren Produktkosten festgelegt werden, muss auch der technische Praktiker die grundlegenden Kostenbegriffe und Funktionen der Kostenrechnung kennen, welche hier erläutert werden. Die Kostenrechnung stellt die zentrale Basis für die Erfassung, Verwaltung und Auswertung der Kosten im Unternehmen dar. Besonders wichtig sind die Herstellkosten innerhalb des Unternehmens, wobei nicht nur diese im Fokus der Entwicklung stehen sollten, sondern der gesamte Lebenszyklus eines Produktes sollte aus Kostensicht berücksichtigt und optimiert werden. Zur Unterteilung des sehr umfassenden Begriffs der Kosten werden unterschiedliche Kostenstrukturen anhand eines CNC-Drehzentrums erklärt. Die Kostenstrukturen sind als Perspektiven zu interpretieren. Je nach Perspektive, z. B. bezogen auf die unterschiedlichen Materialien oder Fertigungsschritte, ergeben sich Potenziale für eine Kostenoptimierung. Um Kostenoptimierungen gezielt durchführen zu können, müssen vorab noch die Einflussfaktoren auf die Herstellkosten transparent gemacht werden. Hierzu werden der Einfluss der Anforderungen an das Produkt, die zu realisierenden Produktfunktionen sowie die Lösungskonzepte erläutert. Sind diese beeinflussenden Größen festgelegt, bestimmen weiterhin die Wahl des Werkstoffs, die Bauteilgeometrie, die notwendige Toleranz und die Stückzahl das Fertigungsverfahren. Auch diese Größen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten des Produktes und müssen daher schon in einer frühen Phase der Entwicklung berücksichtigt werden.

---

## 3.8 Normung und Normen im Produktentstehungsprozess (Heinz Gaub, Mario Schacht)

### Abkürzungsverzeichnis

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación Spanische Normungsorganisation
AFNOR	Association Française de Normalisation Französische Normungsorganisation
ANSI	American National Standards Institute Normungsorganisation der USA
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BSI	British Standards Institution Britische Normungsorganisation
CD	Committee Draft
CE	Conformité Européenne Europäisches Konformitätszeichen

CEN	Comité Européen de Normalisation Europäisches Komitee für Normung
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CWA	CEN Workshop Agreement
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN/DIN VDE	Deutsches Norm-Dokument (+Zählnummer)
DIN EN	Deutsches Norm-Dokument mit europäischem Ursprung (+Zählnummer)
DIN EN ISO	Deutsches Norm-Dokument mit europäischem oder internationalem Ursprung (+Zählnummer)
DIN ISO	Deutsches Norm-Dokument mit internationalem Ursprung (+Zählnummer)
DIN SPEC	Deutsche Spezifikation
DIS	Draft International Standard Umfrageentwurf
DITR	DIN Software Informationsdienst über Technische Regeln
DGQ	Deutsche Gesellschaft für Qualität
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
DNS	Deutsche Normungsstrategie
EBN	Entwicklungsbegleitende Normung
EFTA	European Free Trade Association
EN	Europäisches Norm-Dokument (+Zählnummer)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
F&E	Forschung und Entwicklung
FDIS	Final Draft International Standard Schlussentwurf
FprEN	Projet de Norme Européenne pour vote formel Europäischer Schlussentwurf
FRAND	Fair, Reasonable and Non Discriminatory
FWS	Fachwortschatz
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
ICS	International Classification System
IEC	International Electrotechnical Commission
IPR	Intellectual property right geistiges Eigentumsrecht
ITU	International Telecommunication Union
INS	Innovation mit Normen und Standards
ISO	International Organization for Standardization Internationale Normungsorganisation

---

ISO	Internationales Norm-Dokument (+Zählnummer)
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
NEN	Nederlands Normalisatie-Instituut
	Niederländische Normungsorganisation
NBN	Bureau voor Normalisatie/Bureau de Normalisation
	Belgische Normungsorganisation
PAS	Publicly Available Specification
PEP	Produktentstehungsprozess
prEN	Projet de Norme Européenne
	Europäischer Norm-Entwurf
QM	Qualitätsmanagement
SA	Standards Australia
	Australische Normungsorganisation
SC	Subcommittee
SCC	Standards Council of Canada
	Kanadische Normungsorganisation
SI-Einheiten	internationales Einheitensystem
SIS	Standardiseringsorgan i Sverige
	Schwedische Normungsorganisation
SNV	Schweizerische Normen-Vereinigung
	Schweizer Normungsorganisation
TC	Technical Committee
TR	Technical Report
TS	Technical Specification
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
	Italienische Normungsorganisation
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDE	VDE-Norm (+Zählnummer)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDI	VDI-Richtlinie (+Zählnummer)
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VDMA	VDMA-Einheitsblatt (+Zählnummer)
VG	Verteidigungsgerätenorm
WTO	World Trade Organization
	Welthandelsorganisation

Ingenieure werden in der Praxis zunehmend mit Normen, Normung und Europäischen Richtlinien zur Produktsicherheit konfrontiert. Im Studium werden diese Themen jedoch selten ausführlich behandelt. Ebenso erkennen viele Studierende und Praktiker nicht die Chancen, die sich aus der Normung im Innovationsprozess ergeben. Zwar verfügen viele Hochschulen über Normenzugänge (digitale Auslegestelle und maßgeschneiderte

Rechercheinstrumente), aber unter welchen Voraussetzungen ein Dokument angewendet werden soll oder muss, ist bei Studenten oft unklar.

Nicht nur die Anwendung von Normen wird im Lehrbetrieb oft unzureichend behandelt, sondern auch deren Entstehung. Wie entsteht eine Norm auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene und wie kann ein Fachmann mitwirken und seine Expertise einbringen? Wann sollte sich ein Unternehmen in der Normung und Standardisierung engagieren und wie kann dies geschehen? Bei der Beantwortung dieser Frage ist besonders darauf zu achten, wie sich die Mitwirkung an der Normung und Standardisierung auswirkt. Der strategische Aspekt der Mitgestaltung und Anwendung von Normen muss vom Management jedes Unternehmens erkannt werden. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, dass zukünftige Führungskräfte bereits im Studium die Grundlagen „Strategischer Normung“ kennen lernen.

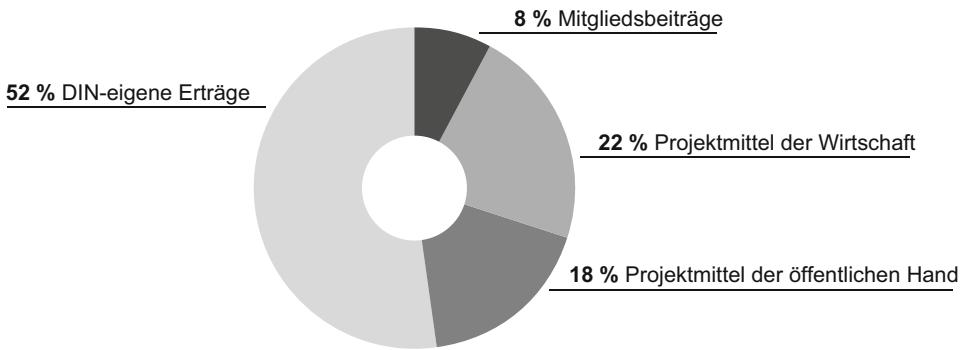
Im modernen Unternehmensumfeld mit vielen Konkurrenten, hohem Preisdruck und hohen Kundenerwartungen ist die Normung ein strategisches Instrument, um sich zukunftsorientiert am Markt zu positionieren. Um dieses Instrument jedoch sinnvoll anwenden zu können, müssen die wichtigsten Aspekte der Normung und Standardisierung und deren Rolle im Produktentstehungsprozess bekannt sein. Daher möchte der vorliegende Beitrag Studenten, Auszubildenden, Technikern und Ingenieuren, aber auch dem Management einen Einblick in die Normung und ihre strategische Bedeutung für ein Unternehmen und seine Wettbewerbsfähigkeit verschaffen. Dabei liegen die Schwerpunkte auf der Bedeutung der Normung im Innovationsprozess, der Bereitstellung von Normen in den unterschiedlichen Geschäftsprozessen und dem volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Nutzen der Normung.

### 3.8.1 Normung und Normen

#### 3.8.1.1 Normungsorganisation DIN e. V.

Gemäß dem Vertrag mit der Bundesrepublik Deutschland von 1975 ist das DIN Deutsches Institut für Normung e. V. die zuständige nationale Normungsorganisation und die nationale Mitgliedsorganisation in den internationalen Normungsorganisationen (DIN e. V. 1975) CEN (Europäisches Komitee für Normung) und ISO (Internationale Normungsorganisation). Das DIN bietet einen „runden Tisch“, an dem die interessierten Kreise konsensbasierte Normen markt- und zeitgerecht erarbeiten. Weiterhin verpflichtet sich das DIN, bei seinen Normungsarbeiten das öffentliche Interesse zu berücksichtigen und gewährleistet faire Verfahrensrichtlinien, um die Partizipation schwächerer Wirtschaftspartner zu ermöglichen. Ebenso hat das DIN dafür zu sorgen, dass von der Bundesregierung durch zwischenstaatliche Vereinbarungen eingegangene Verpflichtungen zur Liberalisierung des Handels und zum Abbau technischer Handelshemmnisse nicht durch DIN-Normen behindert werden (DIN e. V. 1975).

Das DIN ist ein eingetragener, privatwirtschaftlich getragener und gemeinnütziger Verein, der 1917 in Berlin gegründet wurde und dessen Unternehmensziel es ist, Normen



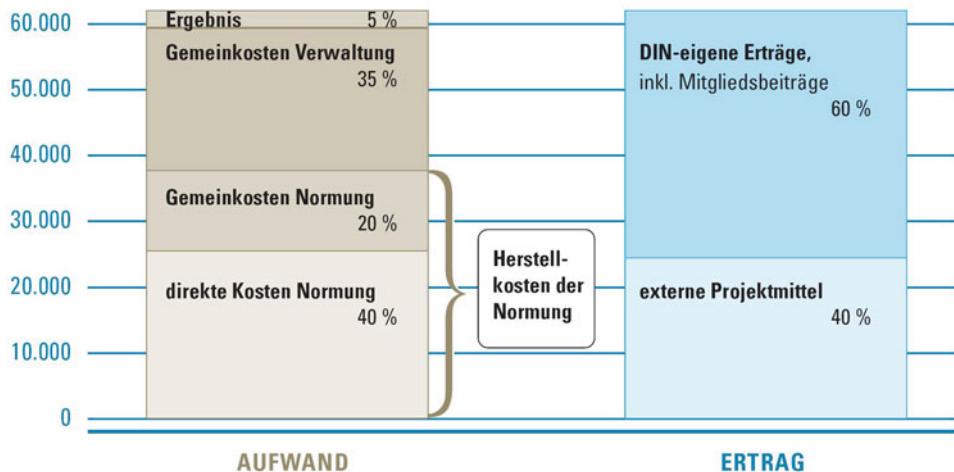
**Abb. 3.97** Ertragsstruktur des DIN (DIN e. V. 2009b)

zum Nutzen der Wirtschaft und der gesamten Gesellschaft zu entwickeln. Das DIN ist Teil der DIN-Gruppe, zu der auch mehrere Tochtergesellschaften und Beteiligungen gehören. Die Tochtergesellschaften sind die Beuth Verlag GmbH (2010) und die DIN Software GmbH (2010). Die Kernkompetenz der Beuth Verlag GmbH liegt in ihrem Angebot an Fachinformationen rund um das Thema Normung. Die Aufgabe der DIN Software GmbH besteht in der Beschaffung, Aufarbeitung und Bereitstellung von Normen, technischen Regeln und Vorschriften nationaler, europäischer und internationaler Regelsetzer. Beteiligungen hält das DIN an den Unternehmen DIN GOST TÜV Berlin-Brandenburg, DQS GmbH und DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH. Mit rund 28.600 externen Fachexperten und 380 eigenen Mitarbeitern in 58 internen und 14 externen Normenausschüssen erarbeitet das DIN jährlich rund 2.300 Normen, Norm-Entwürfe und Spezifikationen.

Weiterhin führt das DIN Sekretariate von Technischen Komitees, Unterkomitees und Arbeitsgruppen bei CEN und ISO, um auf europäischer und internationaler Ebene die deutschen Normungsinteressen zu vertreten. Die an der Normung beteiligten Kreise setzen sich aus sämtlichen Bereichen der Gesellschaft zusammen: kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), Großunternehmen, Handwerk, Gewerkschaften, Verbände, Wissenschaft, Forschung, staatliche Organisationen und Nicht-Regierungsorganisationen, wie z. B. Verbraucher- und Umweltschutzorganisationen (DIN e. V. 2009b).

### 3.8.1.2 Finanzierung

Die fachliche Beratung und das Prozessmanagement bei der Erarbeitung der Normen, die Interessenwahrnehmung in den weltweit stattfindenden Gremiensitzungen von CEN und ISO und die steuernden und unterstützenden Grundfunktionen des DIN verursachen Kosten pro Jahr von rund 62 Mio. €. Diese Kosten werden zu 52 % durch die DIN-eigenen Erträge gedeckt, die hauptsächlich aus dem Verkauf der Normungsergebnisse, von Zins-erträgen, Mieterträgen usw. erzielt werden, sowie zu 8 % aus den Mitgliedsbeiträgen. Zu weiteren 22 % finanziert sich das DIN aus Projektmitteln der Wirtschaft und zu 18 % aus Projektmitteln der öffentlichen Hand (s. Abb. 3.97). Die Zuwendungen der öffentlichen



**Abb. 3.98** Aufwands- und Ertragsstruktur des DIN e. V. nach dem Umsatzkostenverfahren für das Geschäftsjahr 2008 (DIN e. V. 2009b)

Hand bestehen ausschließlich aus projektbezogenen Mitteln, das DIN erhält somit keinerlei institutionelle Grundförderung.

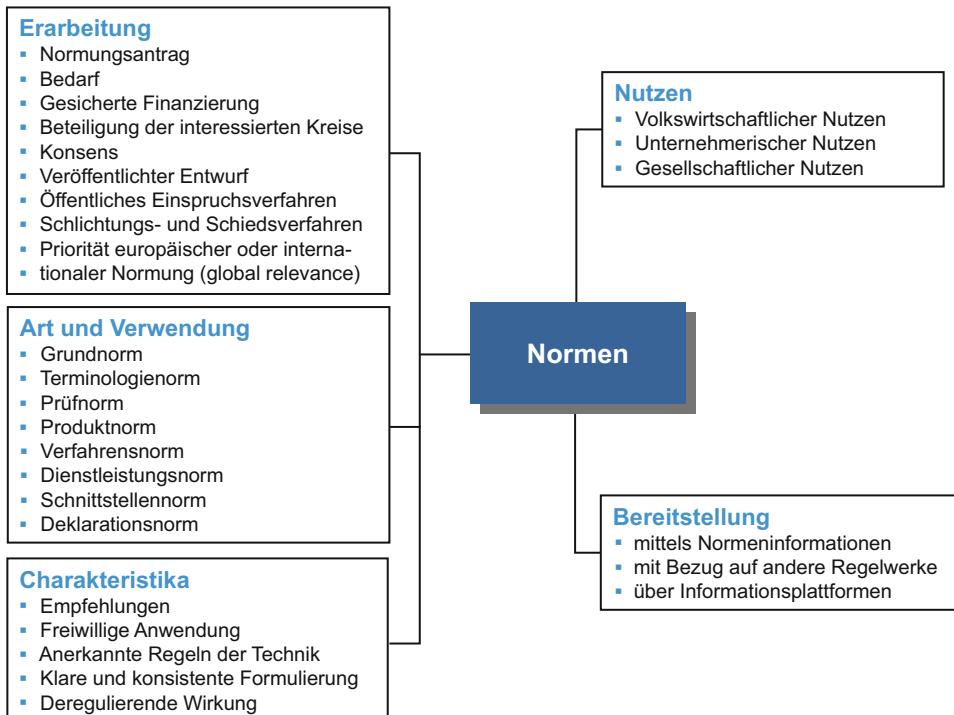
Die Normungsarbeit im DIN verursacht direkte Kosten in Höhe von rund 25 Mio. € jährlich. Hierin enthalten sind die direkten Personalkosten, die für die Normungsarbeit notwendigen Reisekosten und auch sonstige direkte Sachkosten wie die Beauftragung von wissenschaftlichen Untersuchungen, der Bezug von Fachliteratur und weitere bezogene Leistungen.

Um das direkte Geschäft der Normung zu koordinieren und auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene ständige Fachpräsenz zu zeigen sowie die satzungsmäßigen Zielsetzungen und damit die Interessen der Kunden vertreten zu können, fallen weitere Kosten an, die ein jährliches Volumen von rund 12 Mio. € haben. Diese indirekten Kosten (Gemeinkosten Normung) sind ebenfalls der Normungsarbeit zuzuordnen und gelten mit den direkten Kosten zusammen als Herstellkosten der Normung.

Die zentralen Grundfunktionen im Unternehmen verursachen jährliche Kosten (Gemeinkosten Verwaltung) von rund 22 Mio. €. Hierzu zählen vor allem die gesamte IT-Infrastruktur und IT-Entwicklung, die wiederum Effizienzsteigerungen und Kostenentlastungen bei den externen Experten ermöglichen, aber auch das Rechnungswesen, Controlling, Personalmanagement und Justiziariat (DIN e. V. 2009b).

Das führt zu einer Aufwands- und Ertragsstruktur nach dem Umsatzkostenverfahren, wie es in Abb. 3.98 dargestellt ist.

Deutlich wird hierbei, dass die direkten Kosten der Normungsarbeit, die durch die Bearbeitung der Projekte ausgelöst werden, nahezu vollständig durch die direkten Erträge, d. h. externe Projektmittel der Wirtschaft und der öffentlichen Hand, finanziert werden. Die indirekten Kosten werden durch die DIN-eigenen Erträge gedeckt. Dieses grundsätzliche



**Abb. 3.99** Erarbeitung, Bereitstellung und der Nutzen von Normen (Hartlieb et al. 2009)

Finanzierungssystem bietet allen an der Finanzierung der Normungsarbeit Beteiligten die notwendige Sicherheit, um die mehrjährigen Norm-Projekte in gemeinsamer Abwägung der Risiken und die Übernahme der darin enthaltenen Verantwortung auf ein finanziell sicheres Fundament zu stellen.

### 3.8.1.3 Verschiedene Aspekte von Normen im Überblick

Normen unterscheiden sich von anderen technischen Dokumenten. Das gilt sowohl für den Entstehungs- und Publikationsprozess als auch für ihre typischen Dokumenteneigenschaften. Die wichtigsten Kriterien sind in Abb. 3.99 im Überblick dargestellt:

**Erarbeitung** Normen werden mit einem geregelten Verfahren erarbeitet. Notwendige Voraussetzungen sind ein bestehender Bedarf, eine gesicherte Finanzierung, gemeinschaftliche Erarbeitung durch die interessierten Kreise in ausgewogener Beteiligung, die Veröffentlichung eines Entwurfs mit einem anschließenden öffentlichen Einspruchsverfahren und die Konsensfindung. Der Normungsprozess wird in Abschn. 3.8.1.4 erläutert.

**Art und Verwendung** In Bezug auf ihre Themen und Anwendungszwecke unterscheidet man verschiedene Arten von Normen. Diese haben in den Prozessen der Unternehmen jeweils unterschiedliche Rollen (Hartlieb et al. 2009).

**Charakteristika** Normen sind Empfehlungen, deren Anwendung freiwillig ist. Bindend werden Normen nur dann, wenn sie Gegenstand von Verträgen sind oder der Gesetzgeber ihre Einhaltung zwingend vorschreibt. Sie stellen Lösungswege für allgemeine und wiederkehrende Anwendungen dar und sind anerkannte Regeln der Technik. Damit bietet der Bezug auf Normen in Verträgen Rechtssicherheit. Jedoch muss beachtet werden, dass Normen keine Rechtsnormen sind. Sie können allgemein gültiges Recht daher nicht ersetzen, aber es ergänzen. Im Rechtsstreit billigt ein Richter den DIN-Normen regelmäßig den Beweis des ersten Anscheins zu, woraus eine Beweislastumkehr folgt, siehe auch Abschn. 3.8.3.3. Ebenso haben Normen einen staatsentlastenden Charakter und eine deregulierende Wirkung, da sie gesetzliche Anforderungen konkretisieren. Dabei werden keine technischen Sachverhalte mehr in Rechtsnormen festgehalten, sondern nur noch allgemeine Anforderungen. Diese werden dann durch Normen konkretisiert, auf die in Rechtsnormen verwiesen wird. Sollten sich die technischen Anforderungen ändern, so wird nur die Norm geändert und nicht die Rechtsnorm. Dies entlastet die staatliche Gesetzgebung und bietet die Möglichkeit, den Stand von Wissenschaft und Technik jederzeit indirekt in die Rechtsnormen einfließen zu lassen.

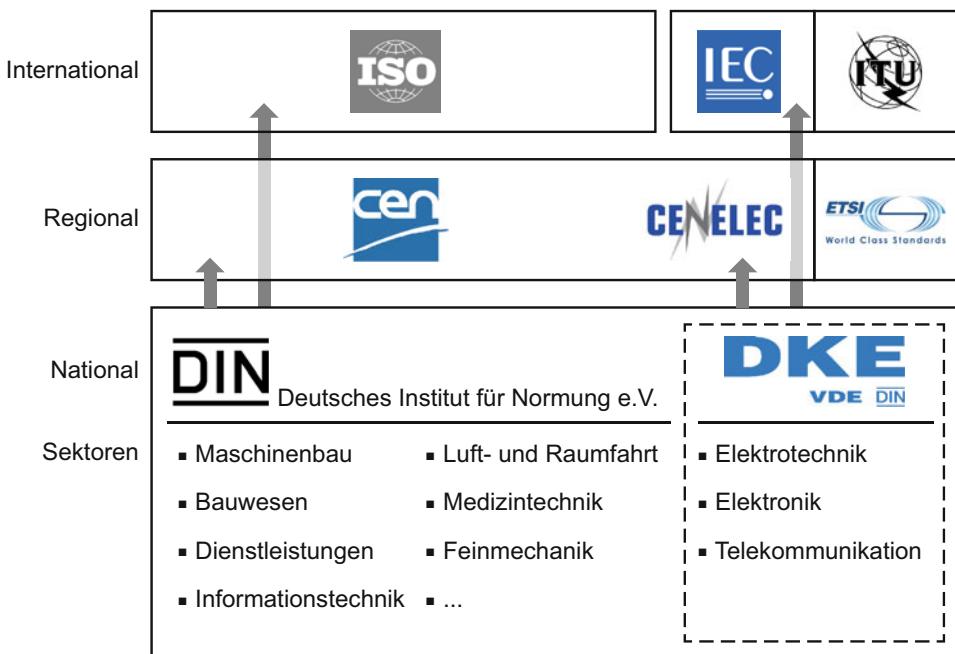
**Bereitstellung** Normen und ihre Inhalte werden über Informationsplattformen bereitgestellt. Hierbei ist es wichtig, dass auch die Zusammenhänge zu anderen technischen Regelwerken sowie zu Rechtsvorschriften erfasst und verfügbar gemacht werden, s. Abschn. 3.8.2.

**Nutzen** Grundlegendes Ziel der Normung ist es, einen wirtschaftlichen Nutzen zu generieren. Der Nutzen kann volkswirtschaftlicher, unternehmerischer und gesellschaftlicher Natur sein. Wie ein Nutzen durch Normung generiert werden kann, wird in Abschn. 3.8.3 detailliert beschrieben und mit Beispielen belegt.

### 3.8.1.4 Der Normungsprozess

Die Normung versteht sich als eine gemeinnützige Gemeinschaftsaufgabe von Wirtschaft, Wissenschaft, Staat und Gesellschaft. Sie wird planmäßig durch die interessierten Kreise durchgeführt und stellt die Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen zum Nutzen der Allgemeinheit dar (Gaub 2010). Die Normung unterliegt den Normungsgrundsätzen, wie z. B. Freiwilligkeit, Konsens, Widerspruchsfreiheit und Stand von Wissenschaft und Technik. Die Normung kann nur als Gemeinschaftsaufgabe realisiert werden, wenn sich alle interessierten Kreise wie Industrie, Handel, Forschung, Handwerk, öffentliche Hand und Verbraucher gleichermaßen engagieren.

Normungsvorhaben können nicht nur auf regional unterschiedlichen Ebenen durchgeführt werden, sondern es ist auch die historisch gewachsene Selbstständigkeit der Elektrotechnikbranche zu beachten. Sämtliche Normungsvorhaben, die die Themengebiete Elektrotechnik, Elektronik und Telekommunikation betreffen, werden von einer separaten Gruppe von Normungsorganisationen bearbeitet (Abb. 3.100).



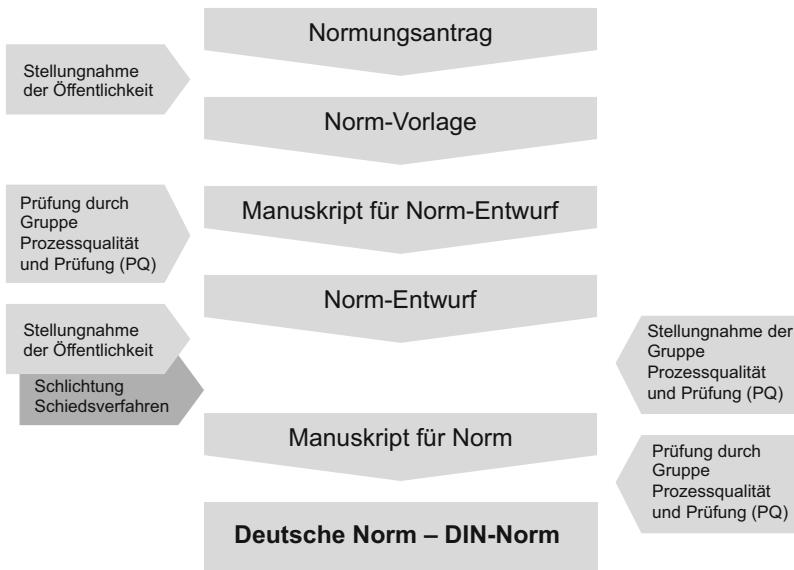
**Abb. 3.100** Arbeitsebenen der Normung (Gaub 2010)

Generell wird ein Normungsvorhaben auf nationaler Ebene durch das DIN, auf europäischer Ebene durch das Europäische Komitee für Normung CEN und auf internationaler Ebene durch die Internationale Organisation für Standardisierung ISO betreut. Nahezu alle Bereiche werden durch diese Normungsorganisationen abgedeckt, wobei die Elektrotechnik- und Telekommunikationsbranche durch eigene Organisationen betreut wird:

- national: Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE DKE,
- europeisch: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung CENELEC, European Telecommunications Standards Institute ETSI und
- international: International Electrotechnical Commission IEC, International Telecommunication Union ITU.

Sowohl in der ISO als auch in der IEC ist je Land ein Mitglied vertreten, meist die nationalen Normungsorganisationen. Die Arbeitsebenen der Normung sind in Abb. 3.100 dargestellt.

Ein Normungsvorhaben beginnt mit einem Normungsantrag an eine nationale Normungsorganisation, den jede natürliche und juristische Person in Schriftform stellen darf. Anschließend wird überprüft, auf welcher Ebene (national, europäisch oder international) das Normungsvorhaben durchgeführt werden soll. Gibt es bereits ein Normungsvorha-



**Abb. 3.101** Entstehung einer nationalen Norm (Gaub 2010)

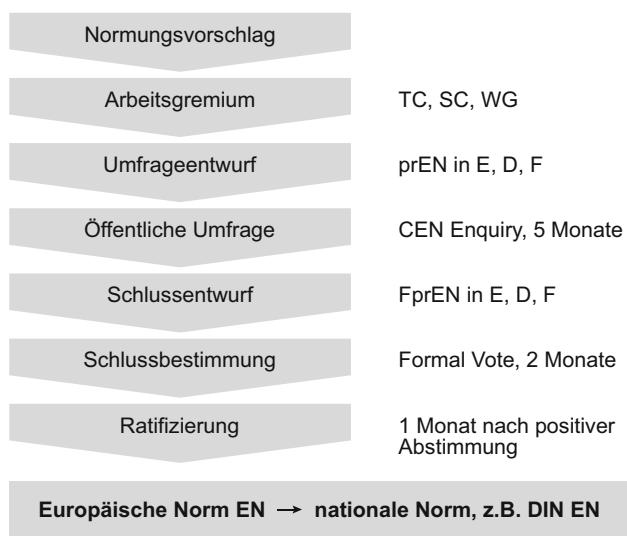
ben auf europäischer oder internationaler Ebene, so gilt die Stillhaltevereinbarung. Diese besagt, dass kein neues Normungsvorhaben auf nationaler Ebene begonnen werden darf, wenn es schon ein europäisches oder internationales Normungsvorhaben zum gleichen Thema gibt.

Inhaltlich werden Normen von Experten der interessierten Kreise erarbeitet, welche durch ihre entsendenden Stellen autorisiert und entscheidungsbefugt sind. Die Experten sind in Arbeitsausschüssen organisiert, die fachlich und organisatorisch von Projektbetreuern und Projektkoordinatoren des DIN betreut werden. Nur wenn eine breite Beteiligung aller interessierten Kreise in einem Normprojekt erreicht wird, in dem deren Vertreter in einem angemessenen Zahlenverhältnis zueinander stehen, kann eine demokratische Legitimation der Normung erlangt werden. Dies ist auch die Voraussetzung dafür, dass Normen zur Konkretisierung von Rechtsvorschriften herangezogen werden können.

Die Entstehung einer deutschen Norm kann in sechs Phasen unterteilt werden. Diese sind in Abb. 3.101 dargestellt. Die Entstehung einer europäischen Norm ist in Abb. 3.102 dargestellt.

Die Ratifizierung einer europäischen Norm erfolgt automatisch einen Monat nach einem positiven Abstimmungsergebnis zum Schlussentwurf. Die Stimmgewichtung der einzelnen Länder ist für die Europäische Union in dem Vertrag von Nizza (Europäische Union 2003) festgelegt. Nach der Ratifizierung muss eine europäische Norm von den nationalen Normungsorganisationen unverändert als nationale Norm übernommen werden, abweichende nationale Normen sind zurückzuziehen. Im Regelfall haben die übernommenen Normen ein nationales Titelblatt, ein nationales Vorwort und ggf. nationale Anhänge. Die Harmonisierung der Normen in den Mitgliedsländern bewirkt die Vereinheitlichung

**Abb. 3.102** Entstehung einer europäischen Norm (Gaub 2010)



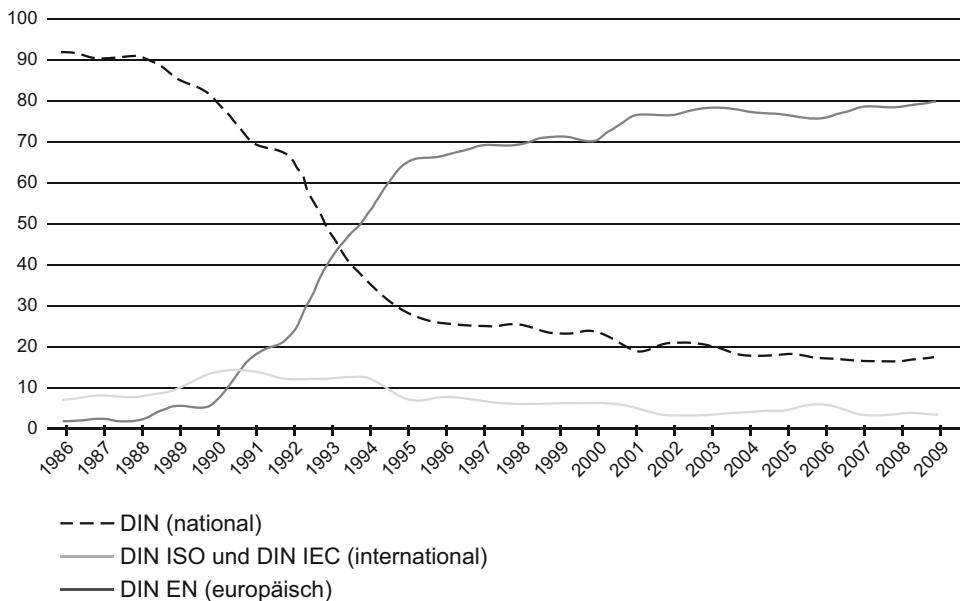
**Abb. 3.103** Entstehung einer internationalen Norm (Gaub 2010)



und Kohärenz der nationalen Regelwerke. Dadurch werden Handelshemmnisse abgebaut, gleiche Rahmen- und Wettbewerbsbedingungen geschaffen und der freie Warenverkehr im europäischen Wirtschaftsraum gefördert. Zudem werden damit nationale Volkswirtschaften neuer Mitglieder in den europäischen Binnenmarkt integriert (Vertrag von Lissabon, Amtsblatt der Europäischen Union 2008/C 115/01 (2008)).

Der Normungsprozess zur Erarbeitung einer internationalen Norm ist in Abb. 3.103 dargestellt.

Es besteht keine Verpflichtung für die nationalen Normungsorganisationen, internationale Normen zu übernehmen. Wird eine internationale Norm jedoch im Rahmen der Wiener Vereinbarung oder des Dresdener Abkommens im Parallelverfahren europäisch übernommen, müssen anschließend alle CEN/CENELEC-Mitglieder die Norm unverändert auch national übernehmen.



**Abb. 3.104** DIN-Normen nach ihrer Herkunft (in %) (Gaub 2010)

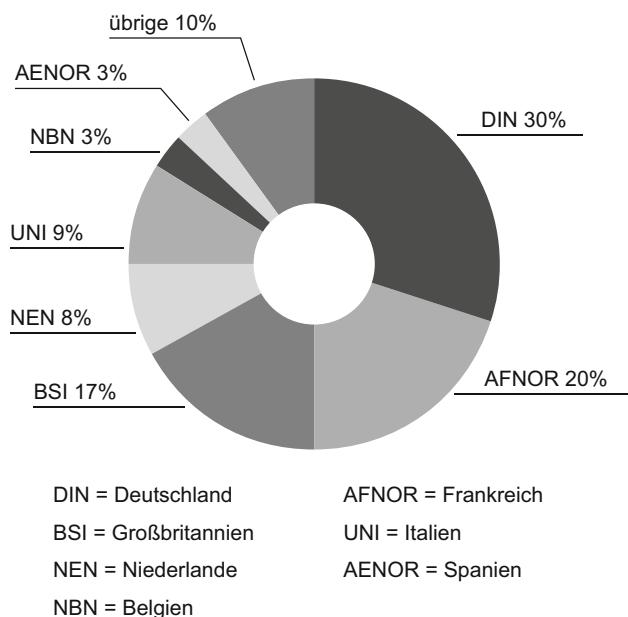
Die Wiener Vereinbarung wurde 1991 beschlossen und regelt die technische Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN. Dabei soll durch parallele Abstimmungsverfahren Doppelarbeit vermieden und ein international einheitliches Normenwerk geschaffen werden. Das gleiche Ziel hat das Dresdener Abkommen, welches seit 1996 die Zusammenarbeit zwischen IEC und CENELEC regelt.

Das DIN konzentriert seine Arbeit auf die europäischen und internationalen Normungsgremien. Mehr als 85 % der Normungsarbeit des DIN werden heute europäisch oder weltweit erbracht, s. Abb. 3.104. Die verbleibenden nationalen DIN-Normen werden häufig als Vorstufe für die europäische und internationale Normung erarbeitet. Das DIN fördert damit die Exportfähigkeit der deutschen Wirtschaft und sichert auf diese Weise Arbeitsplätze in der Industrieproduktion und der Dienstleistungsbranche.

Die internationale Normung wird durch die nationalen Normungsgesellschaften betreut. Die Entscheidung für eine aktive Mitarbeit auf internationaler Ebene wird in einem Normenausschuss des DIN von den autorisierten Experten getroffen. Die fachliche Betreuung der Arbeit wird einem Arbeitsausschuss, einem sog. Spiegelgremium, zugewiesen. Dieser ermittelt die deutsche Meinung zu einem internationalen Normungsthema, entwickelt eigene Vorschläge und entsendet Delegierte zum internationalen Gremium, die die deutsche Meinung vertreten und in den Konsensprozess der internationalen Normung einbringen. Die Sekretariate der europäischen und internationalen Gremien werden dezentral von den Mitgliedsorganisationen in aller Welt geführt.

Im Unterschied zur europäischen Normung bei CEN und CENELEC haben die Mitglieder der internationalen Normung bei ISO und IEC jeweils nur eine Stimme. Es besteht für

**Abb. 3.105** Verteilung der CEN-Sekretariate für TCs und SCs nach Ländern (DIN e. V. 2010e)



die nationalen Mitglieder die Möglichkeit, aber keine Verpflichtung, internationale Normen in das nationale Normenwerk zu übernehmen. Die Welthandelsorganisation WTO strebt jedoch eine stärkere Verpflichtung zur Übernahme der ISO- und IEC-Normen in die nationalen Normenwerke an.

Die Vorreiterrolle Deutschlands in der europäischen und internationalen Normung und Standardisierung spiegelt sich auch in der Anzahl der Sekretariate wider, die Deutschland führt, wie Abb. 3.105 und 3.106 zeigen (Stand Februar 2010).

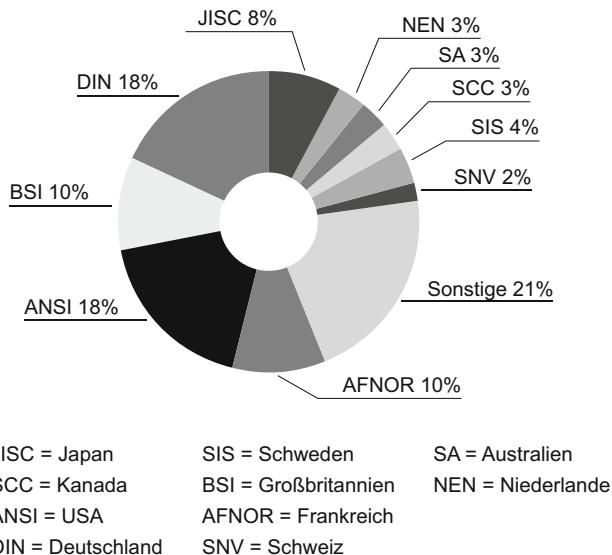
### 3.8.1.5 Normen und Spezifikationen

Die Hierarchie der technischen Regelungen und deren Einteilung bezüglich der Entwicklungszeit und des Konsensgrades wird in Abb. 3.107 gezeigt. Das DIN stellt als fachlicher Berater und als Prozess-, Projekt- und Konsensmanager nationale, europäische und internationale Normen und Spezifikationen zur Verfügung (DIN e. V. 2009d). Spezifikationen schließen die Lücke zwischen Verbund- und Konsortialstandardisierung und konsensbasierter Normung (Glauner 2007) und stellen damit ein innovatives Instrument dar. Hintergrund für die Entwicklung eines solchen Produktes ist das Verlangen der beteiligten Kreise nach schnelleren Verfahren und Publikationsweisen, insbesondere in Gebieten mit hoher Innovationsgeschwindigkeit (Bahke 2012).

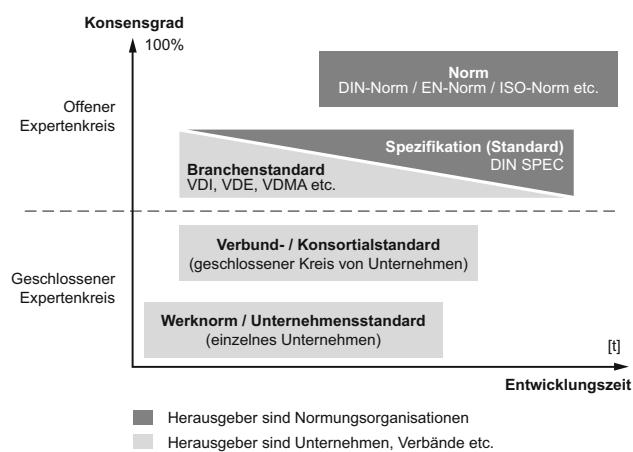
Die Publikationsformen der technischen Regeln können jedoch nicht nur bezüglich Konsensgrad und Entwicklungszeit unterschieden werden, sondern auch hinsichtlich ihres regionalen Wirkungskreises und der zeitlichen Wirkung (Tab. 3.7).

Normen werden wie folgt unterschieden, wobei die Unterscheidung anhand des Dokumententyps kenntlich gemacht wird:

**Abb. 3.106** Verteilung der ISO-Sekretariate für TCs und SCs nach Ländern (DIN e. V. 2010e)



**Abb. 3.107** Unterscheidung zwischen verschiedenen Normarten und Spezifikationen (Gaub 2010)



**Tab. 3.7** Abgrenzung von Normen und Spezifikationen (Gaub 2010)

	National	Europäisch	International
Kurzfristig	DIN SPEC	CWA	ISO-PAS
Mittelfristig	DIN SPEC	TS/TR	TS/TR
Langfristig	DIN	EN	ISO/IEC

**DIN/DIN VDE** Nationale Norm, die ausschließlich oder überwiegend nationale Bedeutung hat oder als Vorstufe zu einem internationalen Dokument veröffentlicht wurde (s. Abb. 3.108). Bei nationalen Normen mit Sicherheitsfestlegungen aus dem Bereich der Elektrotechnik ist an Stelle der Zählnummer die VDE-Klassifikation angegeben (s. Abb. 3.109).

DEUTSCHE NORM		März 2010
	DIN 65058	<b>DIN</b>
ICS 49.030.20		

**Abb. 3.108** Titelleiste einer nationalen DIN Norm (Perinorm 2010)

DEUTSCHE NORM		Februar 2010
	DIN VDE 0620-1 (VDE 0620-1)	<b>DIN</b>
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	<b>VDE</b>

**Abb. 3.109** Titelleiste einer DIN-VDE Norm (VDE-Bestimmung) (Perinorm 2010)

DEUTSCHE NORM		März 2010
	DIN EN 62448	<b>DIN</b>
ICS 35.240.30		Ersatz für DIN IEC 62448:2008-03 Siehe jedoch Beginn der Gültigkeit

**Abb. 3.110** Titelleiste einer deutschen Norm, die von einer europäischen Norm national übernommen wurde (Perinorm 2010)

**DIN EN** Deutsche Ausgabe einer europäischen Norm, die unverändert von allen Mitgliedern der europäischen Normungsorganisationen CEN und CENELEC übernommen werden muss (s. Abb. 3.110).

**DIN ISO/DIN IEC/DIN ISO/IEC** Deutsche Ausgabe einer internationalen Norm, die von ISO und/oder IEC herausgegeben wurde und die unverändert in das Deutsche Normenwerk übernommen wurde (s. Abb. 3.111).

**DIN EN ISO** Deutsche Ausgabe einer internationalen Norm, die mit einer europäischen Norm identisch ist und somit unverändert von allen Mitgliedern der europäischen Normungsorganisationen CEN und CENELEC übernommen werden muss (s. Abb. 3.112).



**Abb. 3.111** Titelleiste einer deutschen Norm, die von einer internationalen Norm national übernommen wurde (Perinorm 2010)

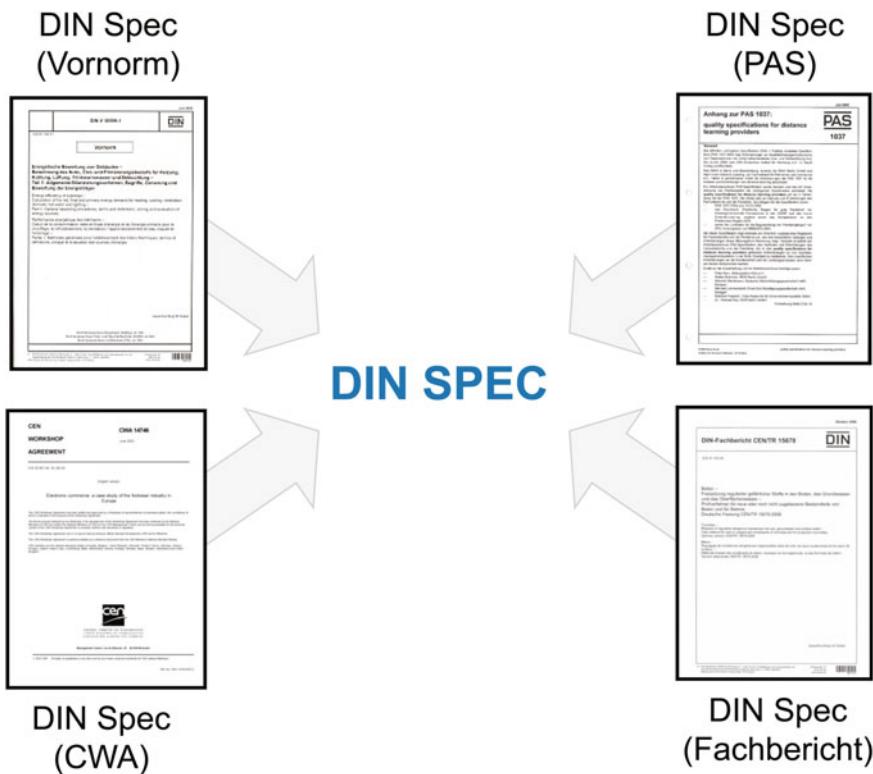


**Abb. 3.112** Titelleiste einer deutschen Ausgabe einer europäischen Norm, die mit einer internationalen Norm identisch ist (Perinorm 2010)

DIN-Normen werden vor ihrer endgültigen Verabschiedung der Fachöffentlichkeit zur Kommentierung vorgelegt. In dieser Phase werden sie als Norm-Entwurf bezeichnet und mit dem Zusatz „E“ gekennzeichnet.

**DIN-Spezifikationen DIN SPEC** Eine Spezifikation SPEC ist ein öffentlich zugängliches Dokument, das Festlegungen für Regelungsgegenstände materieller und immaterieller Art oder Erkenntnisse, Daten usw. aus Normungs- oder Forschungsvorhaben enthält. Es wird durch temporär zusammengestellte Gremien unter Beratung des DIN und seiner Arbeitsgremien oder im Rahmen von CEN-Workshops ohne zwingende Einbeziehung aller interessierten Kreise entwickelt und ist somit nicht voll konsensbasiert. Je nach Verfahren wird zwischen DIN SPEC (Vornorm), DIN SPEC (Fachbericht), DIN SPEC (PAS) und DIN SPEC (CWA) unterschieden (s. Abb. 3.113) (DIN e. V. 2009c; DIN Software GmbH 2010). Spezifikationen ergänzen somit die konsensbasierte Normung, besonders da ihr Erstellungsprozess weniger zeitintensiv ist. Das macht Spezifikationen zu einem Instrument, das innovative Ideen schnellstmöglich und unkompliziert in den Markt trägt und gleichzeitig der Normung zuführt (Schambach 2009).

**DIN SPEC (Vornorm)** Eine DIN SPEC nach dem Verfahren einer Vornorm ist das Ergebnis der Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt, wegen des gegenüber



**Abb. 3.113** DIN-SPEC-Publikationsformen (Gaub 2010)

einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens oder mit Rücksicht auf die europäischen Rahmenbedingungen vom DIN nicht als Norm herausgegeben wird (DIN e. V 2010d). Für die Erarbeitung einer DIN SPEC (Vornorm) gelten die üblichen Regeln für die Normungsarbeit, jedoch muss sie nicht auf dem Konsens aller interessierten Kreise basieren. Jedoch bietet die DIN SPEC (Vornorm) die Möglichkeit, Ergebnisse aus Normungsvorhaben zu nutzen, die nicht veröffentlicht werden können.

**DIN SPEC (Fachbericht)** Eine DIN SPEC nach dem Verfahren eines Fachberichtes ist ein Sachstandsbericht, der Erkenntnisse, Daten usw. aus Normungsvorhaben zur Information über den Stand der Normung – auch anderer internationaler und regionaler Normungsorganisationen – verwendet und der bei späteren Normungsarbeiten als Grundlage herangezogen werden kann (DIN e. V 2010c).

**DIN SPEC (PAS)** Eine DIN SPEC nach dem PAS (Publicly Available Specification)-Verfahren ist eine öffentlich verfügbare Spezifikation, die Produkte, Systeme oder Dienstleistungen beschreibt, indem sie Merkmale definiert und Anforderungen festlegt. Eine PAS wird durch temporär zusammengestellte Gremien unter Beratung des DIN erarbeitet. (DIN e. V 2010c)

April 2009



**DIN SPEC (CWA)** Eine DIN SPEC nach dem CWA (CEN Workshop Agreement)-Verfahren ist eine nationale Übernahme einer CEN/CENELEC-Vereinbarung, die von einem CEN/CENELEC-Workshop entwickelt wurde und den Konsens zwischen den registrierten Personen und Organisationen widerspiegelt, die für ihren Inhalt verantwortlich sind (s. Abb. 3.114).

Die Kennzeichnung der Dokumente erfolgt im letzten Satz des Deckblatts, wo das Verfahren der Erstellung benannt wird.

Spezifikationen nach dem Verfahren PAS und CWA werden nicht nach den in der DIN 820 festgelegten Normungsgrundsätzen erarbeitet, sondern nach internen Arbeitsanweisungen des DIN. Entsprechend können sie nicht zur Konkretisierung von Rechtsvorschriften dienen (Bahke 2012). Spezifikationen nach den Verfahren Vornorm und Fachbericht werden nach den Grundsätzen der DIN 820 erarbeitet. Grundsätzlich eignen sich Spezifikationsverfahren als Vorstufe für die formale Normung (Gaub 2010).

Das DIN bietet jedoch nicht nur die Dienstleistungen für die Erstellung der unterschiedlichen technischen Regeln an, sondern unterstützt die Normung mit weiteren umfangreichen Beratungsdiensten. Somit wirkt das DIN als Partner für Unternehmen, öffentliche Hand, Forschung, Entwicklung und Nicht-Regierungsorganisationen zur fachlichen Beobachtung, Beratung, Mitwirkung und Vorbereitung von Normungsthemen. Die Leistungen auf diesem Gebiet erstrecken sich über ein weites Spektrum. Zum Initiiieren von Normungs- und Spezifikationsvorhaben erarbeitet das DIN Handlungsempfehlungen. Weiterhin berät es beim Ermitteln übergreifender rechtlicher, organisatorischer, wirtschaftlicher und technischer Aspekte im Rahmen der Normung. Außerdem nimmt das DIN einen wichtigen Platz in der Förderung von Innovationen ein, indem es mit passenden Netzwerken für den nötigen Erfahrungsaustausch und die Kooperation beim Erarbeiten von Normen und Spezifikationen sorgt. Schwerpunkte werden dabei sowohl auf die frühzeitige Erkennung von Innovationen als auch auf deren Überführung in marktfähige Produkte gelegt (DIN e. V. 2009c).

### 3.8.1.6 Normung von Managementsystemen

Managementsystemnormen unterstützen Unternehmen dabei, die mit der Lieferung von Produkten und Erbringung von Dienstleistungen verbundenen Risiken zu beherrschen.

Solche Normen bieten eine Basis für Organisationen, ihr bestehendes Managementsystem zu verbessern; weiterhin können sich Unternehmen nach diesen Normen zertifizieren lassen.

Mit Hilfe der Zertifizierung wird die regelkonforme Anwendung bestehender Managementsystemnormen bestätigt. Sie zeigt sowohl den Kunden als auch den Geschäftspartnern, dass ein Unternehmen zertifizierte Geschäftspraktiken anwendet. Eine Zertifizierung kommt durch das freiwillige Engagement einer Organisation oder eines Unternehmens zustande und ist nicht verbindlich vorgeschrieben.

Ein integrativer Ansatz ist die ganzheitliche Anwendung verschiedener Managementsystemnormen. Dabei sollten die Kosten und die Komplexität in einem sinnvollen Gleichgewicht mit dem zu erwartenden Nutzen stehen (Fluthwedel 2009).

Im Folgenden werden die bedeutendsten Managementsystemnormen vorgestellt, deren Anwendung im PEP von Bedeutung ist.

#### **Qualitätsmanagementsystem DIN EN ISO 9001 – Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen**

DIN EN ISO 9001 ist anwendbar, wenn eine Organisation ihre Fähigkeit zur ständigen Bereitstellung von Produkten darzulegen hat, die die Anforderungen der Kunden und die zutreffenden behördlichen Anforderungen erfüllen, und wenn die Organisation danach strebt, die Kundenzufriedenheit durch wirksame Anwendung des QM (Qualitätsmanagement)-Systems zu erhöhen, einschließlich der Prozesse zur ständigen Verbesserung des QM-Systems und zur Erfüllung der genannten Anforderungen (Bahke 2012).

#### **Risikomanagement ISO 31000 – Risikomanagement – Allgemeine Anleitung zu den Grundsätzen und zur Implementierung eines Risikomanagements**

Die ISO 31000 stellt einen Leitfaden dar, der die gebräuchlichsten Verfahren von Risikomanagementprozessen beleuchtet. Diese Norm soll sowohl als praktische Anleitung für die Einführung des Risikomanagements dienen als auch zur Optimierung vorhandener Prozesse. Somit sollen eine Verbesserung der Unternehmensleistung, eine Gewinnverbesserung durch die Reduzierung von Verlusten und eine Steigerung des Bewusstseins für das Risikomanagement in Unternehmen herbeigeführt werden (DIN e. V. 2009a).

#### **Guidance on Social Responsibility DIN ISO 26000 – Leitfaden gesellschaftlicher Verantwortung**

Bei der Norm DIN ISO 26000 „Guidance on Social Responsibility“ geht es um die Verantwortung der Unternehmen für die Folgen ihrer Entscheidungen und ihrer Handlungen gegenüber der Gesellschaft und der Umwelt. Diese Norm soll einen Leitfaden für transparentes und ethisch angemessenes Verhalten darstellen. Soziale Verantwortung betrifft alle Arten von Organisationen und schließt sowohl soziale als auch ökologische Aspekte ein. Es werden acht Kernthemen gesellschaftlicher Verantwortung behandelt: Organisationsführung, Menschenrechte, Arbeitsbedingungen, Umwelt, integre Handlungsweisen von Organisationen, Verbraucherfragen, regionale Einbindung und Entwicklung des Umfelds (Hager 2008).

**Umweltmanagement** DIN EN ISO 14001 – Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitungen zur Anwendung

In der modernen Gesellschaft ist es eine unerlässliche Pflicht jedes Unternehmens, nachhaltige Prozesse zu gewährleisten und somit die Umwelt und die begrenzten Ressourcen zu schonen. Unternehmen, die diese Managementsystemnorm anwenden, gehen über die gesetzlichen Regelungen hinaus und wählen einen umfassenderen Ansatz, mit der Zielsetzung einer kontinuierlichen Reduzierung nachteiliger Umweltauswirkungen.

**Arbeitsschutzmanagement** OHSAS 18001 – Occupational Health- and Safety Assessment Series (britische Norm)

Auch diese Norm ist Teil eines umfassenderen Managementsystemansatzes zur Verbesserung von Unternehmenspraktiken. Sie dient als Anleitung für den ordnungsgemäßen Arbeitsschutz und orientiert sich damit sehr stark an der DIN EN ISO 9001. Die Überführung dieser Norm in eine internationale Norm muss sich größeren Herausforderungen stellen, da dieses Gebiet in der Regel durch nationale Rechtsnormen geregelt wird.

**Energiemanagement** EN ISO 50001 – Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung

Ziel dieser Norm ist, Organisationen beim Aufbau von Systemen und Prozessen zur Verbesserung ihrer energiebezogenen Leistung, einschließlich Energieeffizienz, Energieeinsatz und Energieverbrauch, zu unterstützen (DIN EN ISO 50001 [2011](#)). Diese Norm löst die Vorgängernorm DIN EN 16001 ab und ersetzt diese vollständig. Bei der Erarbeitung der Internationalen Norm ISO 50001 konnten wesentliche Inhalte aus der Europäischen Norm DIN EN 16001 auf internationaler Ebene eingebracht werden. Im Sinne eines einheitlichen Normenwerkes von ISO und CEN konnte damit das Ziel, nur eine weltweit gültige und auch in Europa anerkannte Norm zu Energiemanagementsystemen zu haben, mit der Übernahme der Internationalen Norm ISO 50001 in das Europäische Normenwerk als EN ISO 50001 erreicht werden.

**ISO-Handbuch zur kombinierten Anwendung von Managementsystemnormen** Die Betrachtung der verschiedenen Managementsystemnormen wirft zwangsläufig die Frage nach einem ganzheitlichen Ansatz auf. Müssten Unternehmen und Organisationen Ressourcen für die Einführung sämtlicher Managementsystemnormen bereitstellen, so würde die Akzeptanz sicherlich nicht besonders hoch sein. Das wurde auch von den Normungsorganisationen erkannt, und folglich wurde das Handbuch für „Die kombinierte Anwendung verschiedener Managementsystem-Normen“ publiziert. Dieser Leitfaden soll Organisationen darin unterstützen, den integrierten Ansatz bei der Verwendung mehrerer Managementsystemnormen zu verstehen und anzuwenden (DIN e. V. [2009d](#)). Dabei sollen die bereits vorhandenen Managementstrukturen nicht gänzlich aufgegeben, sondern sinnvoll durch beispielsweise die oben beschriebenen Ansätze ergänzt werden. Die Hauptteile des Handbuchs gliedern sich in die Beschreibung organisatorischer Managementsysteme,

Merkmale von Managementsystemnormen und abschließend Methoden und Beispiele für deren Integration. Da dies einen praxisorientierten Leitfaden darstellt, werden alle Ansätze mit Hilfe von Fallstudien begleitet.

### 3.8.2 Normenbereitstellung

In einer Studie (DIN e. V. 2009a) zeigte sich, dass weniger als 10 % der befragten KMU Normenverwaltungssysteme einsetzen. Daneben wurde festgestellt, dass knapp 40 % nicht wissen, welche für ihr Unternehmen relevanten Normen gesetzlich bindende Kraft haben. Diese Zahlen dokumentieren auf bedenkliche Weise, dass das Wissenspotenzial, das in Normen und Normeninformationen steckt, bisher nur in geringem Maße genutzt wird.

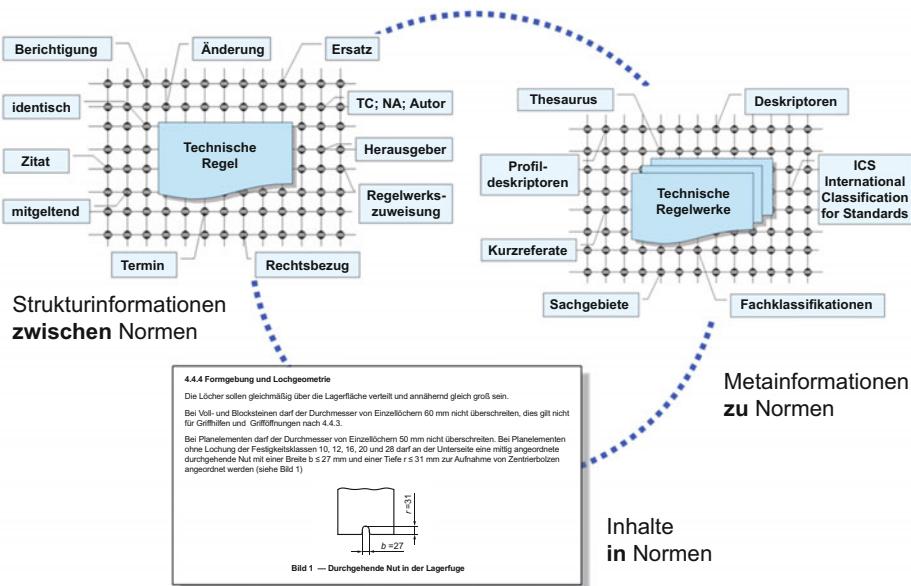
Im folgenden Abschnitt sollen der Nutzen der Normeninformation und deren Bedeutung für die Geschäftsprozesse in Unternehmen erläutert werden.

#### 3.8.2.1 Normeninformation als Teil der Geschäftsprozesse

Normeninformationen sind für die Geschäftsprozesse der Unternehmen von grundlegender Bedeutung. Normen oder allgemein ausgedrückt technische Regeln sind Bestandteil der strategischen Wissensbasis eines Unternehmens. Die systematische Erschließung dieses Wissensfundus ist daher eine Anforderung, die in den Unternehmen methodisch auf hohem Niveau gelöst werden muss. Anwender müssen gezielt und sicher die Suche nach Normen und deren Nachweis durchführen können. Die Normeninformationen müssen den aktuellen Normenbestand widerspruchsfrei, zuverlässig und homogen abbilden (Hertel et al. 2010).

Im Schrifttum und auch in vielfach geführten Diskussionen werden häufig Begriffe – z. T. auch missverständlich – genutzt, die im Folgenden präzisiert werden und in Abb. 3.115 dargestellt sind:

- „Normeninformationen“ (auch Referenzinformationen oder bibliografische Daten genannt) sind Strukturinformationen *zwischen* Normen und Metainformationen *zu* Normen. Normeninformationen zu und zwischen Normen erfüllen grundsätzlich zwei Funktionen:
  - Sie sind Bestandteil eines Normungsdokuments, wie z. B. Herausgeber, Dokumentnummer, Ausgabedatum, Titelangaben und somit Merkmale zur unmittelbaren Identifizierung eines Dokuments. Ihre Funktion ist in ihrer Reichweite auf das eindeutige Erkennen eines Normungsdokuments beschränkt. Darüber hinaus gibt es einen Bestand an Daten zu Normungsdokumenten, die als Merkmale zur Darstellung und Erschließung von formalen Verflechtungen (z. B. Ersatz- und Änderungsbeziehungen, Referenzen, Übernahmen in andere Regelwerke) wie auch inhaltlichen Strukturen (z. B. Klassifikationssysteme) von ganzen Normenwerken an sich und auch von Normenwerken untereinander genutzt werden.



**Abb. 3.115** Normeninformation und Normeninhalte (Schacht und Hertel 2009)

- „Normeninhalte“ sind Informationen *in* Normen und somit geschriebener Bestandteil des Normungsdokumentes. Häufig wird hierfür auch der Begriff „Normungsinhalt“ verwendet, da damit das Ergebnis eines konsensbasierten Normenerarbeitungsprozesses zum Ausdruck gebracht werden soll.

Normeninformationen sind unverzichtbar, um Normen sowie Normeninhalte und deren Verflechtungen für die unterschiedlichen Teilprozesse eines Unternehmens zugänglich zu machen.

Man kann zwischen Kompatibilitätsregeln, variantenreduzierenden Regeln, Anforderungsstandards und Mess- und Informationsregeln unterscheiden, um deren Wirkung in verschiedenen Prozessen eines Unternehmens zu identifizieren (Schubert 2009). Diese Klassifizierung orientiert sich letztlich an den ökonomischen Zielsetzungen, die durch die Nutzung der entsprechenden Normen erreicht werden. In Abb. 3.121 sind – basierend auf einem vereinfachten Prozessmodell entsprechend ISO 9001 (DIN EN ISO 9001 2008) – beispielhaft die wesentlichen Teilprozesse dargestellt und hierin die Nutzung der unterschiedlichen Normen erkennbar.

Es ist ganz offenkundig, dass die Anwendung und Überwachung von Standards in allen Geschäftsprozessen eine Rolle spielt und deshalb nicht allein einer Person im Unternehmen vorbehalten sein kann (Schacht et al. 2012). Normen sind beispielsweise für Tests und Produktzertifizierungen in den frühen Phasen im Vertrieb und der Entwicklung (Produktplanung, Angebotsbearbeitung) sowie im Einkauf (Beschaffung von Zulieferteilen)

zu beachten. Wenn das nicht geschieht, werden wichtige – die Produkteigenschaften bestimmende – Festlegungen mit EU-Richtlinienbezug u. U. erst kurz vor der Auslieferung identifiziert, was dann ggf. zu sehr hohen Kosten bei der Nachbesserung führen kann. Der bestimmungsgemäße Gebrauch von Normen und deren sichere Anwendung sind darüber hinaus eine grundlegende Anforderung jeder Zertifizierung.

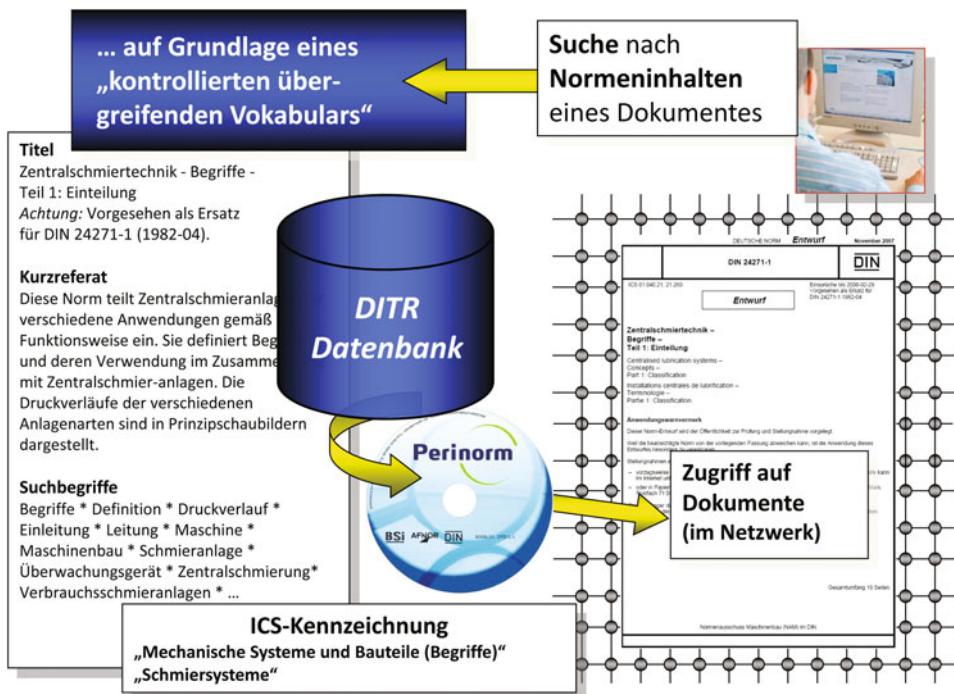
Ein professionelles Normenmanagement umfasst

- die zentrale Überwachung neuer, geänderter und zurückgezogener Dokumente,
- die verteilte Bereitstellung und
- die prozessorientierte Anwendung der Normungsdokumente (Schacht 2012).

Dies kann nur auf der Basis regelmäßiger aktualisierter Normeninformationen geschehen. Und nur so können die Anforderungen von den beteiligten Teilprozessverantwortlichen eines zertifizierten Unternehmens erfüllt werden. In vielen – nicht nur kleinen – Unternehmen besteht die gelebte Auffassung, Normen könne man „im Ordner organisieren“. Die Bedeutung der Geschäftsrelevanz von Normeninformationen wird aus Unkenntnis zu gering bewertet, obwohl deren Wichtigkeit mit anderen Geschäftsdaten (z. B. Anwender-, Lieferanten-, Qualitäts- und Materialdaten) gleichzusetzen ist. Das ist umso erstaunlicher, da gerade in den Themenbereichen z. B. der Zertifizierung, der Einhaltung gesetzlicher Vorgaben und des Änderungsmanagements seitens der Unternehmen Umsetzungsprobleme identifiziert werden (Blind und Mangelsdorf 2009), die gerade mithilfe strukturierter Normeninformationen in einem Normeninformationssystem gelöst werden können.

### **3.8.2.2 Zugang zu Normen mittels Normeninformationen**

**Voraussetzungen für einen gezielten Zugang zu Normen** Wenn über das einfache Identifizieren eines Normungsdokumentes hinaus Normenmanagement betrieben wird, dann reichen kostenlos zur Verfügung stehende Daten, z. B. von Internetseiten der Normungsorganisationen, nicht aus. Vielmehr muss auf Informationen zu Vorgängern und Nachfolgern (alle Verflechtungen und Beziehungen), zu Änderungen (sämtliche Statusinformationen), Identitätsbeziehungen (sämtliche Verflechtungen untereinander), Rechtsverbindlichkeiten (Verflechtungen zwischen Norm und Rechtsvorschrift sowie ein zeitlicher Geltungsbereich) zugegriffen werden können. Soll schließlich die Fülle der so verwaltbaren Normen und technischen Regeln als Wissensbasis eines Unternehmens in vollem Umfang nutzbar sein, dann ist dies nur möglich, wenn neben den einheitlichen Strukturen auch ein einheitliches System der inhaltlichen Erschließung genutzt werden kann. Dazu dienen Notationen aus Klassifikationssystemen (z. B. ICS, Fachgebietsgliederungen) und ein Bestand kontrollierter Suchworte (mehrsprachige Deskriptoren, Thesauri, Terminologie), die nach dezidierten Regeln vergeben werden und somit ein zielgerichtetes Suchen sowie Verwalten und auch Zugreifen auf Volltexte ermöglichen. Durch die vielfältigen Verflechtungen der einzelnen technischen Regeln untereinander entsteht ein Netzwerk von mitgliedenden Regeln und gegenseitigen Verweisen. Abbildung 3.116 zeigt am Beispiel der DITR-Datenbank der DIN Software GmbH, wie diese Verflechtungen transparent gemacht werden, damit



**Abb. 3.116** Zugang zu Normeninhalten über Normeninformationen (Schacht und Hertel 2009)

der Benutzer erkennen kann, welche Regeln in seinem Anwendungsfall gelten. „DITR“ ist heute die Abkürzung für den „DIN Software Informationsdienst über Technische Regeln“ und meint die Informationsdienste, die aus der Datenbank erzeugt werden. Ursprünglich stand DITR für das „Deutsche Informationszentrum für technische Regeln im DIN“, das als eines der 16 Fachinformationszentren in der Bundesrepublik im Oktober 1979 gegründet wurde (Marschall und Mohr 1985).

Mithilfe einer Datenbank – auf Grundlage eines „kontrollierten übergreifenden Vokabulars“ – werden hier

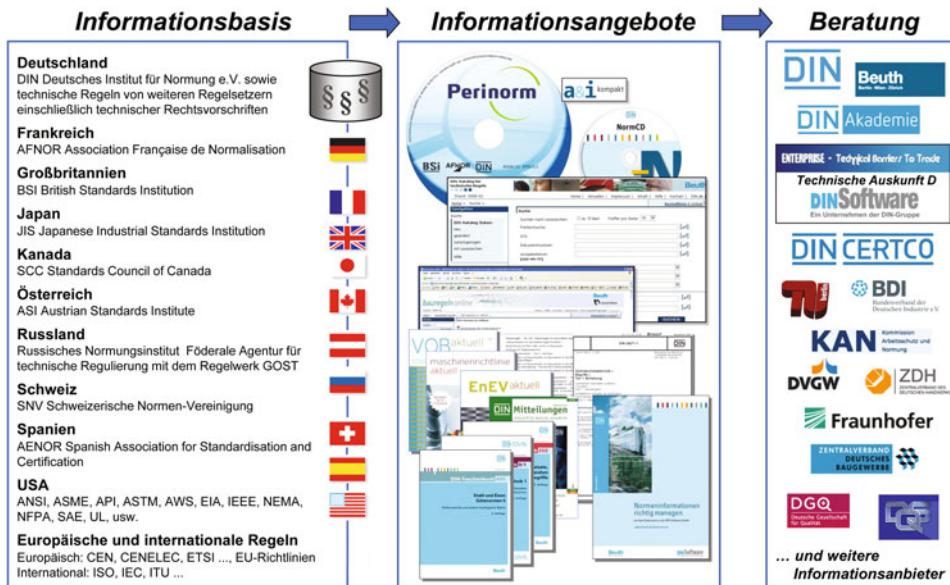
- alle Normen, technischen Regeln und technisch relevanten Rechtsvorschriften und ihre Änderungen erfasst, die vergebenen Schlagworte einer strengen terminologischen Kontrolle unterzogen und zu einem strukturierten Wortschatz unter Verwendung des DITR-Thesaurus verbunden,
- die Indexierung nach festgefügten Regeln konsequent durchgeführt,
- Rechtsverbindlichkeiten und Verflechtungen recherchierfähig indexiert. Dabei sind die rechtlichen Grundlagen sowie ihre zeitlichen, sachlichen und räumlichen Geltungsbereiche anzugeben. Das ist besonders wichtig, wenn sich Rechtsverbindlichkeiten und Verflechtungen aus dem Dokument nicht unmittelbar herauslesen lassen,
- Fundstellen (z. B. Gesetz- und Verordnungsblatt) und Bezugsquellen (Herausgeber) nachgewiesen,

- europäische und internationale Regelwerke, die unter deutscher Beteiligung entstanden sind, berücksichtigt,
- die Benennungen der in der jeweiligen technischen Regel definierten Begriffe recherchierfähig erfasst
- sowie jedem Dokument bei der Bearbeitung Merkmale zugeteilt, die recherchierfähig auf Fachinformationsbereiche verweisen.

**Vorteile für den Anwender** In der DITR-Datenbank werden derzeit 290 nationale, europäische und internationale Regelwerke nachgewiesen. Darunter sind deutsche und europäische Rechtsvorschriften mit technischem Regelungscharakter. Die Bereitstellung von Normeninformationen setzt ein hohes Maß an formaler Gleichartigkeit der Informationen und inhaltlicher Homogenität der Erschließungsresultate sämtlicher Regelwerke voraus, nicht nur der DIN-Regelwerke. Die Qualität der weltweit extern vorliegenden Normeninformationen ist teilweise unzureichend und inhomogen. Mithilfe einheitlicher Regeln werden diese intellektuell und systematisch bearbeitet und in die DITR-Datenbank überführt. Die derart aufbereiteten Normeninformationen werden für unterschiedliche Informationsplattformen über den Beuth Verlag GmbH (2010) bereitgestellt: Normenmanagementsysteme und Portale, Normensammlungen auf CDs/DVDs, Kataloge und Zeitschriften. Die Informationen werden anwenderspezifisch zusammengestellt: Datenformate und -inhalte, Formatierungen, Feldnamen und -längen, Schreibweisen, Kodierungen und Medientransport. Textgebundene Informationen sind in der Regel deutsch- und englischsprachig vorhanden.

Damit wird überhaupt erst die Grundvoraussetzung geschaffen, die für Anwender mit übergreifendem Normennutzungsbedarf einen Mehrwert darstellt. Nur ein geringer Teil der Daten zu Dokumenten entstammen der „hauseigenen DIN-Produktion“ und entsprechen dem erforderlichen Mindeststandard zur Übernahme in die DITR-Datenbank. Zurzeit sind 87 Datenfelder in der DITR-Datenbank angelegt und stehen Anwendern zur Verfügung, um eine einheitliche Nutzung zu unterstützen (Portal zur Normenverwaltung). Untersuchungen (Blind und Jungmittag 2008) zeigen, dass solchermaßen kodifiziertes technologisches Know-how (und dabei handelt es sich in der DITR-Datenbank) einen Beitrag zum Wirtschaftswachstum liefert.

Das Zusammenführen der verschiedensten Regelwerke in eine Datenbank und die formale Vereinheitlichung von Daten – mit dem Ziel der rechnergestützten Verarbeitbarkeit und Verwaltbarkeit – stellen einen außerordentlich hohen Mehrwert für die Nutzer dar. Die DITR-Datenbank ist deshalb auch als „strategisches Gut“ für die Unternehmen bewertet worden, was den Aufbau eines eigenen zentralen Fachinformationszentrums begründet hat (Marschall und Mohr 1985). Ein Unternehmen allein könnte diesen Aufwand wirtschaftlich vertretbar nicht erbringen. Die Nutzung einer globalen Normeninformationsdatenbank bietet den Unternehmen eine große Chance, weitere Rationalisierungspotenziale identifizieren zu können. Unternehmen, die dieses System in ihre Geschäftsprozesse integriert haben, sind in der Lage, gezielt und systematisch Informationen zu selektieren und auszuwerten, um beispielsweise die Produktvarianz zu verringern, die Prüf- und Infrastruk-

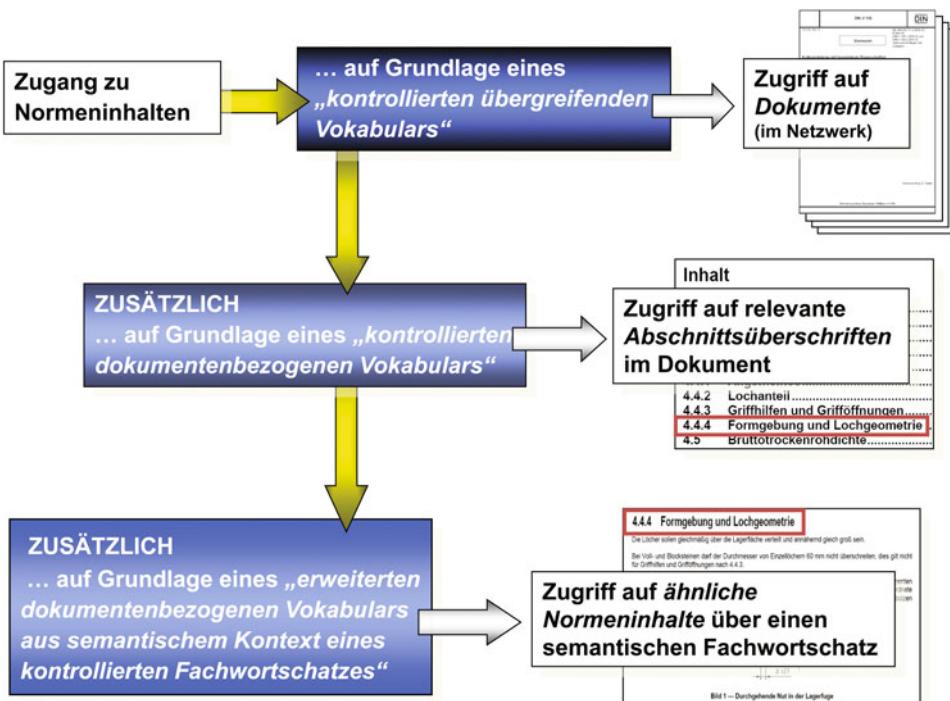


**Abb. 3.117** Informationsangebote und deren Nutzungsmöglichkeiten (Schacht et al. 2012)

turkosten zu reduzieren, die Einkaufskosten zu senken und internationale Marktpräsenz zu schaffen oder auszubauen.

Abbildung 3.117 zeigt auf, wie der Anwender die Normenbereitstellung wahrnehmen kann. Die Vielzahl an internationalen Norminformationen wird durch diverse Medien gebündelt. Die Nutzung kann über klassische Printmedien, z. B. die ausgedruckte Norm oder die Taschenbücher des Beuth Verlags (2010), erfolgen oder über Online-Datenbanken. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit, Beratung in Anspruch zu nehmen, um einen maximalen Nutzen aus der Normbereitstellung zu generieren. Diese gebündelten Informationsangebote dienen damit nicht nur der Erhöhung der Rechtssicherheit, sondern auch der gezielten Implementierung in den Geschäftsprozessen eines Unternehmens sowie der Sicherstellung der Anforderungen im (inter-)nationalen Handel.

Die EU-Kommission hat Anfang des Jahres 2008 in einem ersten Schritt weitreichende Vorschläge zur Verbesserung der Beteiligung der kleinen und mittleren Unternehmen an der Normung und Erleichterung des Zugangs zu Normen gefordert (Bahke 2009a). Der Schwerpunkt der geführten Diskussionen liegt stark auf der Einbeziehung der KMU in die Normungsprozesse (Müller et al. 2009), um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die KMU-gerechte oder, allgemeiner formuliert, die anwendergerechte Aufbereitung von Normeninhalten ist Gegenstand früherer und auch aktueller Untersuchungen (Susanto 1988; Vladova und Weber 2009).



**Abb. 3.118** Erweiterung des Zugangs zu Normeninhalten (Schacht und Hertel 2009)

### 3.8.2.3 Zugriff auf Normeninhalte—Ausblick

Es wird zunehmend anwenderseitig gefordert, dass das zielgerichtete Auffinden des tatsächlich zutreffenden Normeninhaltes in einem Dokument ermöglicht werden soll. Die Anforderung ist nicht neu und wurde bereits sehr früh auch wissenschaftlich untersucht (Schacht 1991). Die Verbesserung einer weitergehenden inhaltlichen Erschließung von Dokumenten erfordert jedoch neue Methoden (Weitkämper 2008).

In Abb. 3.118 ist das mehrstufige Recherche-Konzept vereinfacht dargestellt. Die im Folgenden ausgeführten Nutzungsschritte (Schritt 1–3) stellen den heutigen und zukünftigen Realisierungsstand dar.

**Schritt 1** Auf Basis eines „kontrollierten übergreifenden Vokabulars“ ist eine inhaltliche Identifikation mehrerer Dokumente möglich. Das ist logisch, da die intellektuelle Vergabe des Vokabulars den Dokumentationsregeln der DITR-Datenbank folgt. Der Zugriff erfolgt hier auf komplett Normen und deren Verflechtungen.

**Schritt 2** Auf Basis eines „kontrollierten dokumentenbezogenen Vokabulars“ aus dem Inhaltsverzeichnis eines Dokumentes ist eine tiefergehende Erschließung der Inhalte möglich. Es ist feststellbar, dass der Normeninhalt eines Dokumentes z. T. gut durch die Abschnittsüberschriften selbst repräsentiert wird. Das ist ein erster Ansatz für eine weitergehende

kontrollierte inhaltliche Erschließung, die über den heutigen Stand (Schritt 1) hinausgeht. Eine erweiterte inhaltliche Erschließung des Normeninhaltes eines Dokumentes erfolgt durch die Bereitstellung der in die Grundform überführten Worte aus Inhaltsverzeichnissen.

**Schritt 3** Auf Basis und Nutzung eines aufzubauenden fachspezifischen Sprachkorpus („Fachwortschatz FWS“) ist abweichend – jedoch im Kontext – von den im Dokument verwendeten Worten eine tiefergehende Erschließung der Inhalte dieses Dokumentes möglich. Die zugrunde liegende Idee besteht darin, dass zwischen den lexikalischen Einheiten eines Textes eine Vielzahl semantischer Zusammenhänge bestehen. Ein „einfacher“ Ansatz baut auf der Annahme auf, dass semantisch in Beziehung stehende Einheiten in verschiedenen Umgebungen vermehrt gemeinsam auftauchen. Ein fachspezifischer Sprachkorpus stellt demzufolge die Gesamtheit der semantischen Zusammenhänge eines begrenzten fachbezogenen Wortschatzes dar. Das Konzept macht folglich nur einen Sinn, wenn für abgegrenzte Fachbereiche ein repräsentativer FWS aufgebaut werden kann. Die zusätzlichen kontextbezogenen Schlagworte bieten die Möglichkeit, relevante Texte zu finden, obwohl auch nicht-wortidentische Begriffe für die Suche genutzt werden.

### 3.8.3 Nutzen der Normung

Der Nutzen der Normung hat vielseitige Ausprägungen. Zum einen können ganze Staatengemeinschaften wie z. B. die EU einen Nutzen aus der Normung generieren, zum anderen hat allein die Anwendung von Normen eine positive Auswirkung auf jeden einzelnen Konsumenten von Produkten, die nach anerkannten Regeln der Technik hergestellt wurden. Diese Auswirkung der Normung ist schon in der ISO-Definition einer Norm determiniert. Danach ist beschrieben, dass eine Norm das gesellschaftliche Wohlergehen erhöhen soll.

Grundsätzlich lässt sich der Nutzen der Normung in einen volkswirtschaftlichen und einen betriebswirtschaftlichen (unternehmerischen) Nutzen unterteilen, worauf in den Abschn. 3.8.3.1 und 3.8.3.2 eingegangen werden soll. (WTO – Committee on Technical Barrier to Trade 2009)

#### 3.8.3.1 Volkswirtschaftlicher Nutzen der Normung

Der volkswirtschaftliche Nutzen der Normung entspricht ungefähr 1 % des Bruttoinlandsproduktes in der Bundesrepublik Deutschland. Der Anteil der Normung am Wirtschaftswachstum liegt bei 30 %. Dies geht aus der Studie „Gesamtwirtschaftlicher Nutzen der Normung“ (DIN e. V. 2000) hervor. Normen senken nicht nur die Transaktionskosten und fördern die Zusammenarbeit, sondern sie stützen und forcieren die technische Entwicklung von Innovationen. Resultierend daraus werden bestehende internationale und europäische Absatzmärkte erweitert und neue Märkte geschaffen. Dies ist für die einzelnen Volkswirtschaften von immensem Vorteil, da hierdurch auch der Export und die Beseitigung von Handelshemmnissen erleichtert werden. Aber nicht nur der internationale Handel, sondern auch internationale Qualitätsverbesserung und -sicherung (Glauner 2007) sind Ziele der Normung. Sie unterstützt die Steigerung der Sicherheit für Mensch und Umwelt.

Die folgenden Beispiele dienen dazu, diesen volkswirtschaftlichen Nutzen verständlich und greifbar zu machen.

Nutzungsbereich	Nutzen	Praxisbeispiel
Notwendigkeit von Normung im <b>Gemeinwesen</b>	Technische Normen spiegeln den technischen Entwicklungsstand einer Gesellschaft wider. Mit dem Grad der Entwicklung eines Gemeinwesens steigt auch das Niveau des diesem Gemeinwesen eigenen Normen- und Regelwerkes	Luftabzugseinrichtungen Die Entwicklung der Norm für umweltgerechte Luftabzugseinrichtungen hilft, pro Jahr 77,5 Mio. € Energiekosten einzusparen. Das entlastet die gesamte Volkswirtschaft, aber auch der betriebliche Nutzen ist nicht unerheblich. Weiterhin profitiert auch die Allgemeinheit von einer saubereren Umwelt durch die Anwendung dieser Norm (Gaub 2010)
Normung zur Unterstützung der <b>Kommunikation</b>	Damit Begriffe, auch in unterschiedlichen Sprachen, nicht nur das Gleiche, sondern dasselbe bedeuten, werden sie genormt. Terminologische Festlegungen in Form von Benennungen und Definitionen schaffen Transparenz und dienen der fachlichen Verständigung	Einheitensystem Ohne die gemeinsame Sprache der physikalischen, chemischen, mathematischen und technischen Einheiten (DIN 1301 ff.) wäre eine interkulturelle, fachlich-objektive Kommunikation unter Naturwissenschaftlern nicht möglich. Das genormte internationale Einheitensystem (SI) sorgt für eine weltweit akzeptierte Verständigungsbasis (Gaub 2010)
Normung als Basis für <b>Innovation</b>	Normung hilft, technische Innovationspotenziale zu entfalten, denn Normen machen innovatives Know-how auf breiter Linie bekannt und nutzbar (Gaub 2010)	JPEG 2000 Von hochkomprimierten Bilddaten profitieren alle Internet- und mobilen PC-Nutzer, die ein Maximum an Bildinformationen über eine begrenzte Bandbreite beziehen wollen. Gegenüber dem traditionellen JPEG verfügt die neue Norm JPEG 2000 über ein noch einmal deutlich verbessertes Leistungsniveau
Normung als Grundlage für wirtschaftliche <b>Produktion</b>	Normen bewirken Rationalisierungseffekte, die zu preisgünstigen Massenprodukten führen. Dabei begleiten Normen ein Produkt von der ersten Konzeptidee bis hin zur Massenproduktion (Gaub 2010) und zur umweltfreundlichen Entsorgung	CD-ROM/DVD Nur scheinbar selbstverständlich: CDs haben weltweit die gleichen Maße und sie passen in jeden CD-Spieler. Informationssignale und Spurformen stimmen überein. Die Grundlagen für die Übereinstimmungen stehen in der international gültigen DIN EN 60908

Nutzungsbereich	Nutzen	Praxisbeispiel
Normung zur Unterstützung des Außenhandels	Normen bringen nicht nur Kosten- und Qualitätsvorteile, sondern sie sind auch ein Indikator für die Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft, da Normen in positivem Zusammenhang mit Außenhandelsüberschüssen stehen. Weiterhin verbessern internationale Normen die Wettbewerbsfähigkeit (Gaub 2010)	Datenbank für Kunststoffkennwerte Die Festlegung für Kunststoffe, entsprechend den Normen DIN EN ISO 10350 und DIN EN ISO 11403, schafft erstmals geeignete Voraussetzungen für den Aufbau einer internationalen „Datenbank für Kunststoffkennwerte“. Diese Datenbank bildet heute 90 % des Weltmarktes ab. Das Gemeinschaftsprojekt bewirkte eine Reduzierung der Probekörpervielfalt und erweiterte Automatisierungsmöglichkeiten im Wert von jährlich rund 1 Mio. € je Nutzer – 50 Mio. € weltweit
Normung zur Effizienzsteigerung im Transport	Normen vereinheitlichen das Transportsystem. Dies bezieht sich sowohl auf die Transportbehälter als auch auf einzelne Transportmittel sowie transporttechnische Hilfsmittel. Dadurch werden internationale Märkte miteinander verknüpft	ISO 668 Die Normung der ISO-Container ermöglicht eine Vernetzung der Märkte. Der Ladungsverkehr kann effizienter gestaltet werden, und die Globalisierung wird vorangetrieben

Mit der Normung kann jedoch nicht nur ein wesentlicher volkswirtschaftlicher Nutzen auf nationalökonomischer Ebene erzeugt werden, sondern auch ein betriebswirtschaftlicher Nutzen auf Unternehmensebene, wie im folgenden Abschnitt zu sehen ist.

### 3.8.3.2 Betriebswirtschaftlicher Nutzen der Normung

Normen lassen sich nach ihrer Wirkung in die Gruppen Rationalisierungsnormen, Kompatibilitäts- und Schnittstellennormen, Qualitäts- und Mindestanforderungsnormen, Sicherheitsnormen sowie Informations- und Produktbezeichnungsnormen einteilen, deren betriebswirtschaftliche Einflüsse im Folgenden näher erläutert werden. Wenn die Wirkung von Normen im Unternehmen identifiziert ist, lassen sich direkte und indirekte Effekte ableiten. Direkte Effekte von Normen können über Kosteneinsparungen, Mengenerhöhungen usw. quantifiziert werden. Bei indirekten Effekten müssen Hilfsgrößen für die Berechnung des Nutzens herangezogen werden. Die Wirkungen von Normen für Staat und Öffentlichkeit lassen sich über die Bewertung von normungsgünstigen Gütern oder Dienstleistungen ermitteln. Der qualitative Nutzen von Normen wird anhand einer Argumentenbilanz mit Vorteilen und Nachteilen beschrieben und bewertet (DIN e. V.; j2consult).

Aus den folgenden Verfahren lassen sich Kenngrößen ableiten, die den betriebswirtschaftlichen Nutzen von Normen in einem Unternehmen messbar machen (Gaub 2010).

**Änderung der Produktmenge** Durch die Verwendung einer Norm wird ein Rationalisierungseffekt erreicht. Dadurch kann eine höhere Stückzahl zu gleichen Kosten hergestellt werden. Wird die Differenz mit den Stückkosten bewertet, so ergibt sich daraus eine Kos-

teneinsparung. Wird die Differenz jedoch zu Marktpreisen bewertet, so ergibt sich die mögliche Umsatzerhöhung als Nutzeneffekt.

**Änderung der Zahlungsbereitschaft** Kunden sind eher bereit, sich für ein genormtes Produkt oder eine genormte Dienstleistung zu entscheiden und dafür auch einen höheren Preis zu bezahlen. Es tritt sowohl eine Preis- als auch eine Mengenerhöhung auf, was zu einer Umsatzsteigerung führt.

**Änderung des Marktpreises** Durch die Verwendung einer Norm steigt die Nachfrage und damit der Marktpreis, der für ein Produkt erzielt werden kann. Bleiben die Herstellkosten konstant, steigt der Stückgewinn pro Einheit auf Grund des höheren Marktpreises. Steigen jedoch auch die Herstellkosten, so führt die Umsatzerhöhung mindestens zu einer Kompensation der zusätzlichen Herstellkosten und im Idealfall zu einer Überkompensation, d.h. auch wiederum zu einer Gewinnsteigerung.

**Kostenveränderungen im Unternehmen** Durch die Verwendung von Normen können die Herstellkosten pro Stück gesenkt werden. In der Produktion wird die Differenz der Stückkosten mit der hergestellten Menge bewertet und so die gesamte Kosteneinsparung festgestellt. Bei Dienstleistungen wird die Differenz der eingesparten Zeit einer Dienstleistung mit den jeweiligen Zeikosten bewertet und die Kosteneinsparung ermittelt.

**Transaktionskosten** Die Verwendung einer Norm kann auch zur Senkung der Transaktionskosten führen. Beispielsweise kann ein Unternehmen durch den Einsatz von Qualitätsnormen Verhandlungs- und Abstimmungskosten mit potenziellen neuen Lieferanten sparen oder aber die Abhängigkeit von einem oder weniger Lieferanten vermeiden. Dies kann in Zeitersparnis und in Ersparnis der Kommunikationskosten gemessen werden.

**Bewertung durch die Preise anderer Güter** Hilfsweise kann der Nutzen durch die Verwendung einer Norm über Hilfsgrößen gemessen werden. Bei Umweltnormen werden verschiedene Schäden beispielsweise über den Ressourcenbedarf von Wasser oder Boden bewertet.

In einem Unternehmen kann der Nutzen der Normung zum einen durch die aktive Teilnahme am Normungsprozess und zum anderen durch die aktive Anwendung der Normen generiert werden. Unternehmen, die sich aktiv am Normungsprozess beteiligen, nehmen Einfluss auf die Normungsergebnisse. Weiterhin haben diese Unternehmen einen Wissens- und Zeitvorsprung, da das Wissen über die Inhalte der Norm den Beteiligten schon vor der Veröffentlichung zur Verfügung steht. Die beteiligten Unternehmen kommen auch der Gesetzgebung zuvor. Entscheidend ist dabei, dass das eigenständige Agieren günstiger ist als das Reagieren. „Wer nicht normt, der wird genormt“ (Wucherer 2006). Somit können

„verordnete“ Umstellungskosten vermieden werden. Auch können Forschungs- und Entwicklungskosten verringert werden, da Erkenntnisse, Wissen und Informationen durch alle Beteiligten erarbeitet, ausgetauscht und bereitgestellt werden.

Der betriebswirtschaftliche Nutzen der Normung für ein Unternehmen kann täglich in der Praxis erfasst werden, wie folgende Beispiele zeigen:

Normung für den <b>globalen Handel</b> Beispiel Portalkrane	ISO-Container oder große Einzelfrachtstücke wie Maschinen oder Fahrzeuge verlangen nach Brücken- oder Portalkrane. Die europäische Norm DIN EN 15011 „Portal- und Brückenkrane“ hilft den Planern und Herstellern dieser Krane, die geeignete Konstruktion zu realisieren. Die Norm beinhaltet Festlegungen, wie die Anforderungen an die Festigkeit und Stabilität der Krane korrekt ermittelt werden. Außerdem beschreibt sie, welchen Sicherheitsanforderungen die elektronische und nicht-elektronische Ausrüstung entsprechen muss
Normung zur Förderung von <b>Innovationen</b> Beispiel Nanotextilien	Ein sehr bekanntes und stark verbreitetes Produkt der Nanotechnologie sind sog. Nanotextilien. Doch nicht alle Textilien, die mit dem Zusatz „Nano“ verkauft werden, sind auch wirklich mit Nanomaterialien beschichtet. Deshalb wird eine Norm entwickelt, die Verbraucher und Industrie vor Etikettenschwindel schützen soll. Mit diesem Prüfverfahren wird sich nachweisen lassen, wie wasserabweisend (hydrophob) ein bestimmtes Textil wirklich ist. Die Norm wird u. a. auf Grundlage der vorhandenen Norm DIN EN 24920 „Textilien; Bestimmung der wasserabweisenden Eigenschaften (Sprühverfahren)“ erarbeitet
Normung als Notwendigkeit für <b>Nachhaltigkeit</b> Beispiel Holzschutzmittel	Um Termiten zu bekämpfen und den Holzschutz nachhaltig zu fördern, ohne dabei die Umwelt einer übermäßigen Belastung durch Giftstoffe auszusetzen, hat sich das Prüfverfahren DIN EN 117 „Holzschutzmittel – Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegenüber Reticulitermes-Arten (europäische Termiten) (Laboratoriumsverfahren)“ bewährt. Mit ihm lässt sich sehr genau die Konzentration eines Biozids bestimmen, die notwendig ist, um das Holz vor dem Angriff durch Erdtermiten vollständig zu schützen
Normung als Basis für gestiegene <b>Sicherheitsanforderungen</b> Beispiel Absperrventile	Wer nachweisen kann, dass seine Produkte oder Dienstleistungen dem Stand der Technik hinsichtlich Effizienz und Sicherheit entsprechen, wirkt überzeugend und gewinnt Vertrauen. Zu den besten Argumenten der Hersteller von Absperrventilen gehört die europäische Norm DIN EN 161 „Automatische Absperrventile für Gasbrenner und Gasgeräte“. Sie legt Sicherheits-, Bau- und Funktionsanforderungen an automatische Absperrventile fest. Für die deutschen Produkte sind internationale Normen, so ein renommierter deutscher Hersteller, der „Reisepass in andere Länder“

### 3.8.3.3 Normung und Recht

**Haftung und Vertragsgrundlage** Die Anwendung von Normen ist grundsätzlich freiwillig, es sei denn, Normen sind Gegenstand von Verträgen zwischen Parteien, oder der Gesetz-

geber schreibt ihre Einhaltung zwingend vor. Da Normen anerkannte Regeln der Technik sind, bietet der Bezug auf Normen in Verträgen Rechtssicherheit. Normen sind aber nicht zu verwechseln mit Rechtsnormen, denn sie werden durch private Regelsetzer erarbeitet. Sie können nicht allgemein verbindliches Recht setzen, aber sie können es ergänzen. Eine anerkannte Regel der Technik ist eine technische Festlegung, die von einer Mehrheit repräsentativer Fachleute als Wiedergabe des Standes der Technik angesehen wird. Der Stand der Technik ist ein entwickeltes Stadium der technischen Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, basierend auf gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung (DIN e. V. 2010c).

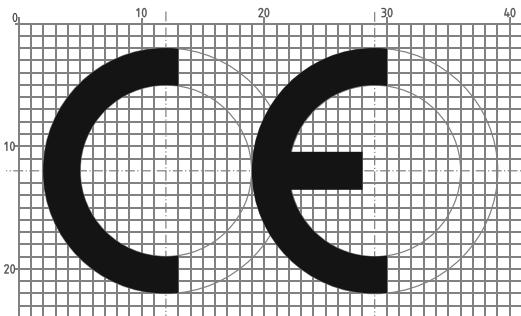
Ein Anreiz zur Anwendung von Normen liegt in der dadurch entstehenden Rechtssicherheit. Das deutsche Produzentenhaftungsrecht sieht vor, dass grundsätzlich der Hersteller eines Produktes haftet (§ 823 Abs. 1 BGB). Im Falle der nachgewiesenen Anwendung von Normen geht jedoch im Rechtsstreit ein Richter davon aus, dass den Hersteller keine Schuld trifft. Daher billigen Richter den DIN-Normen regelmäßig den „Beweis des ersten Anscheins“ zu, woraus eine Beweislastumkehr folgt. Daraus ergibt sich, dass der Hersteller nicht mehr seine Schuldlosigkeit beweisen, sondern dass der Kläger dem Hersteller die Schuld nachweisen muss.

Die Abweichung von der Norm bedeutet nicht zwangsweise fehlerhaftes Verhalten, da Normen nur Anforderungen definieren und mögliche Lösungswege darstellen. Entscheidend ist, was Vertragspartner vereinbart haben. Umgekehrt bedeutet normgerecht nicht unbedingt Fehlerfreiheit eines Produkts (Gaub 2010). Die deutsche Gerichtspraxis bewertet in der Regel die „praktische Tauglichkeit der Arbeitsergebnisse der Normung für den ihnen zugesuchten Zweck“. Im Einzelfall ist jedoch stets zu prüfen, ob die technische Norm den gesetzlichen Stand richtig wiedergibt. Entscheidend dafür ist die Vollständigkeit, Aktualität und Sachgerechtigkeit des Normungsverfahrens. Daher sind Anforderungen an das Normungsverfahren in einer speziellen Normenreihe geregelt – DIN 820 (DIN 820, Normenreihe zur Normungsarbeit).

Die Rezeption von Normen in der Rechtsordnung erfolgt mittels Inkorporation, Verweisung oder einer Generalklausel. Eine Inkorporation ist eine vollständige, teil- oder auszugsweise Übernahme von technischen Normen in Rechtsnormen. Eine Verweisung ist die Bezugnahme auf Regelungen außerhalb der jeweiligen Rechtsnorm. Zu unterscheiden ist dabei die starre, die gleitende und die erweiterte Verweisung. Bei der starren Verweisung wird auf bestimmte Regelungen mit Ausgabedatum verwiesen, die gleitende Verweisung verweist auf bestimmte Regelungen in der jeweils aktuellen Fassung, und die erweiterte Verweisung verweist auf in europäischen Rechtsvorschriften festgelegte Sicherheitsanforderungen und deren Konkretisierung durch Normen. Bei der Generalklausel werden unbestimmte Rechtsbegriffe, wie z. B. „anerkannte Regel der Technik“, verwendet.

**New Approach – Neue Konzeption** Der „New Approach“ ist ein innovatives Werkzeug zur technischen Harmonisierung im europäischen Binnenmarkt. Er wurde vom Europäischen Rat im Mai 1985 beschlossen und hat zu einer klaren Trennung der Aufgaben zwischen der Europäischen Kommission und den europäischen Normungsorganisationen CEN, CENELEC und ETSI geführt. Seither unterstützen CEN, CENELEC und ETSI die

**Abb. 3.119** CE-Zeichen  
(Gaub 2010)



Umsetzung des freien Waren- und Dienstleistungsverkehrs auf dem europäischen Binnenmarkt. Richtlinien der Europäischen Union in Übereinstimmung mit dem „New Approach“ legen grundlegende Anforderungen (z. B. in Bezug auf Gesundheitsschutz, Arbeitssicherheit und Umweltschutz) fest, die die Produkte, bevor sie im europäischen Wirtschaftsraum in Verkehr gebracht werden dürfen, erfüllen müssen. Durch die Anwendung harmonisierter Normen von CEN, CENELEC und ETSI können diese Anforderungen erfüllt und die Übereinstimmung mit den Richtlinien gewährleistet werden. Die Richtlinien gemäß dem „New Approach“ stärken durch das Festlegen von Anforderungen das Vertrauen der Verbraucher in die auf den europäischen Binnenmarkt gebrachten Produkte. Europäische Normen legen zusätzliche Qualitätskriterien (DIN e. V. 2010c) fest.

Die Anwendung von Europäischen Normen (EN) ist freiwillig. Ein Bedarf an Europäischen Normen kann von verschiedenen Stellen angemeldet werden, wobei die Mehrzahl der Normungsvorschläge aus der Wirtschaft kommt. Das Gros der Europäischen Normen wird vornehmlich zur Deckung des unmittelbaren Normungsbedarfs der europäischen Wirtschaft und nicht zur Unterstützung europäischer Richtlinien erarbeitet. Ist bereits eine Richtlinie vorhanden, kann der Hersteller jede technische Lösung wählen, die die grundlegenden Anforderungen dieser Richtlinie erfüllt. Arbeitet er auf der Grundlage von harmonisierten Europäischen Normen, so kann davon ausgegangen werden, dass die Konformität mit den in der Richtlinie festgelegten, grundlegenden Anforderungen erfüllt ist. Verwendet er jedoch ein eigenes, nicht standardisiertes Verfahren, so muss er eine umfangreiche technische Dokumentation vorlegen, wie z. B. Nachweise von anerkannten Prüfstellen (benannten Stellen), die die Übereinstimmung mit den Anforderungen der Richtlinie belegen. Die Anwendung europaweit gültiger, harmonisierter Europäischer Normen eröffnet Herstellern einen Markt mit mehr als 480 Mio. Verbrauchern in 30 Ländern (DIN e. V. 2010c).

Der Hersteller kann also davon ausgehen, dass bei korrekter Anwendung harmonisierter Europäischer Normen die grundlegenden Anforderungen der entsprechenden EU-Richtlinie erfüllt sind. Dies wird als Vermutungswirkung der harmonisierten Europäischen Normen bezeichnet. Die entsprechende Konformitätserklärung muss jedes Unternehmen selbst erstellen und durch das Aufbringen des CE-Zeichens (Abb. 3.119) auf das betreffende Produkt kenntlich machen. Die CE-Kennzeichnung bedeutet „Com-

munautés Européennes“. Sie ist das äußere Zeichen dafür, dass ein Produkt den dem Hersteller auferlegten Anforderungen der Europäischen Gemeinschaft entspricht. Sie darf nur dann angebracht werden, wenn für das Produkt auch eine Richtlinie gilt, die die CE-Kennzeichnung vorsieht.

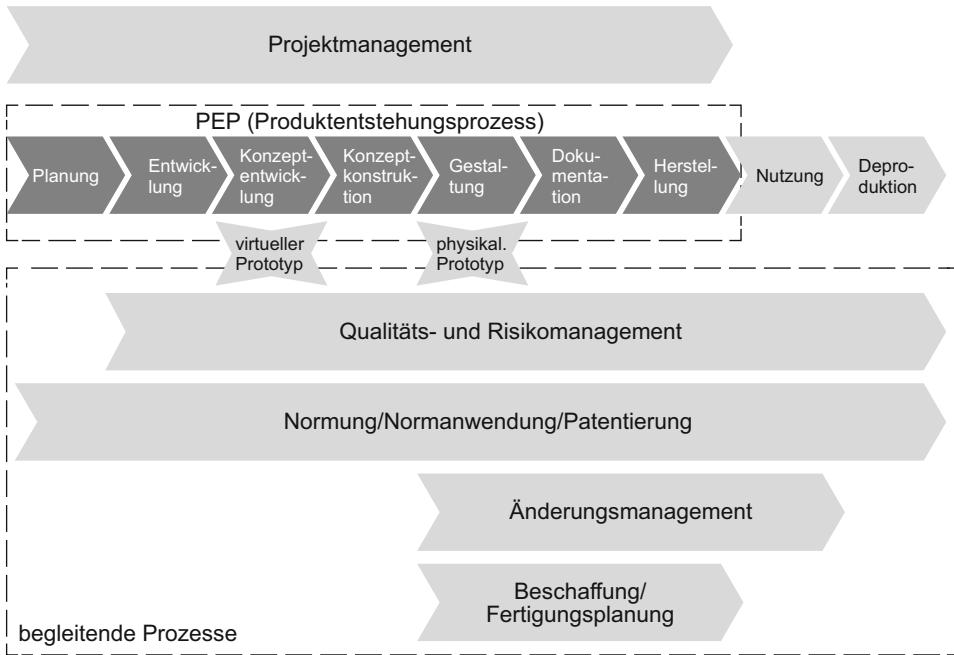
**Urhebernutzungsrecht an Normen und Spezifikationen** Öffentlichkeit ist eine wesentliche Grundlage der internationalen Normung. Dementsprechend muss das DIN Normen und andere Arbeitsergebnisse wie z. B. Entwürfe der Öffentlichkeit zugänglich machen. Dafür muss das DIN jedoch das vollständige Urhebernutzungsrecht an diesen Arbeitsergebnissen innehaben. Die beteiligten Experten sind die Autoren einer Norm, die dazu verpflichtet werden, mit einer einmaligen Erklärung die Urhebernutzungsrechte abzutreten. Mit der Einräumung dieser Urhebernutzungsrechte wird der gesetzlichen Anforderung Genüge getan und das DIN in die Lage versetzt, die Norm verwerten zu können, was dem Grundsatz der Öffentlichkeit entspricht. Somit kann das DIN Normen veröffentlichen, ohne befürchten zu müssen, dass Mitautoren ihre Ansprüche an den Texten geltend machen. Weiterhin ist das DIN gegenüber CEN/CENELEC und ISO/IEC verpflichtet, die Sicherung der Urhebernutzungsrechte für die internationale Normung zu garantieren. Nur so können gemeinsam erarbeitete Normen in allen europäischen Ländern oder weltweit veröffentlicht werden und dem Abbau von Handelshemmnissen dienen (DIN e. V. 2010c).

### 3.8.4 Normung im Innovationsprozess

#### 3.8.4.1 Integration von Normung und Innovation

Der Produktentstehungsprozess PEP besteht aus verschiedenen Teilprozessen von der „Planung“ bis zur „Deproduktion“, s. Abb. 3.120. Unterstützende Prozesse sind u. a. das Projektmanagement, das Risikomanagement, Normung, Normenanwendung und Patentierung sowie das Änderungsmanagement. So sind das Projektmanagement, das Risikomanagement und das Änderungsmanagement typische Teilprozesse, die sich innerhalb des PEP abspielen. Eine strategisch orientierte Normung und Patentierung beginnt jedoch ebenso wie die Anwendung von Normen und Patenten weit vor dem PEP und geht auch weit darüber hinaus.

Normen generieren bei ihrer Anwendung in Innovationsprozessen einen vielseitigen Nutzen. Zum einen ermöglichen sie eine schnellere Umsetzung von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen in die Praxis. Das ist wichtig für alle beteiligten Akteure, da die Industrie zeitnah die Möglichkeit bekommt, die Forschungs- und Entwicklungskosten zu amortisieren, und die Nutzer immer auf dem neuesten Stand der Technik sind. Von Bedeutung ist aber nicht nur die Anwendung von Normen im Innovationsprozess, sondern auch die aktive Teilnahme an der Normung selbst. Die Normung kann hierbei eine wesentliche Funktion bei der Überführung von Innovationen in marktfähige Produkte übernehmen. Weiterhin bieten Normung und Standardisierung der Wirtschaft Investitionssicherheit. Der bedeutendste Nutzen der Normung ist jedoch die Schaffung und Öffnung von Märkten für Innovationen. Dieser Nutzen ist bei der internationalen Normung besonders ausgeprägt und stellt speziell für KMU ein wichtiges Instrument dar (Gaub 2010).

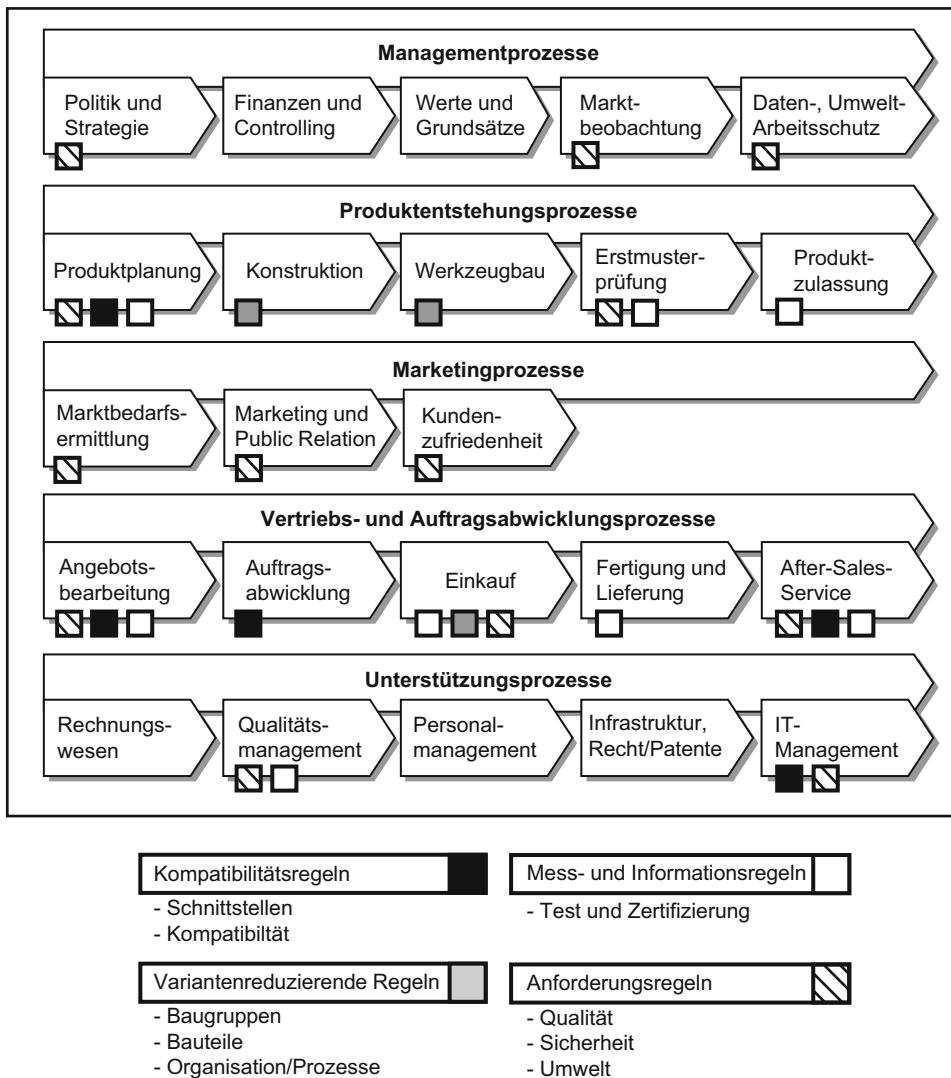


**Abb. 3.120** Normen und Patente im Produktentstehungsprozess

Die frühzeitige Besetzung zukünftig relevanter Normungsfelder und die Sicherung der Vorreiterrolle, wie beispielsweise bei der Elektromobilität, dienen besonders der Förderung der eigenen Wirtschaft. Nur wer frühzeitig innovative Technologien erkennt, kann seine eigenen Erkenntnisse einbringen. Normung und Standardisierung erzeugen jedoch nicht nur einen direkten Nutzen, sondern sie vernetzen auch relevante Akteure und haben somit eine Netzwerkfunktion für ein Expertenforum. Die Normung wirkt somit wie ein Transmissionsriemen zwischen Erkenntnissen in F&E-Prozessen und industrieller Verwertung (Glos 2007). Um die Bedeutung der Normung für die Marktfähigkeit von Innovationen noch stärker hervorzuheben, ist eine kontinuierliche Bewusstseinsbildung bei Normenentwicklern und Normenanwendern herbeizuführen. Dazu müssen vor allen Dingen die obersten Führungsebenen zum Thema Normung sensibilisiert werden. Die Verankerung von Normung und Standardisierung in öffentlichen Forschungsprogrammen, die Verwendung von Normung als Instrument zum Wissens- und Technologietransfer und die Aufnahme der strategischen Bedeutung von Normung und Standardisierung in das Hochschulangebot sind weitere Maßnahmen (Gaub 2009b).

### 3.8.4.2 Normen in Unternehmens- und Innovationsprozessen

Technische Regeln wie Normen und Spezifikationen können auf vielfältige Weise klassifiziert werden. Eine mögliche Klassifizierung orientiert sich an ökonomischen Zielsetzungen, die durch die Nutzung der entsprechenden Normen erreicht werden können (Schubert 2009). Danach ergeben sich Kompatibilitätsnormen, variantenreduzierende Normen, Anforderungsnormen und Mess- und Informationsnormen. Die unterschiedlichen Normen

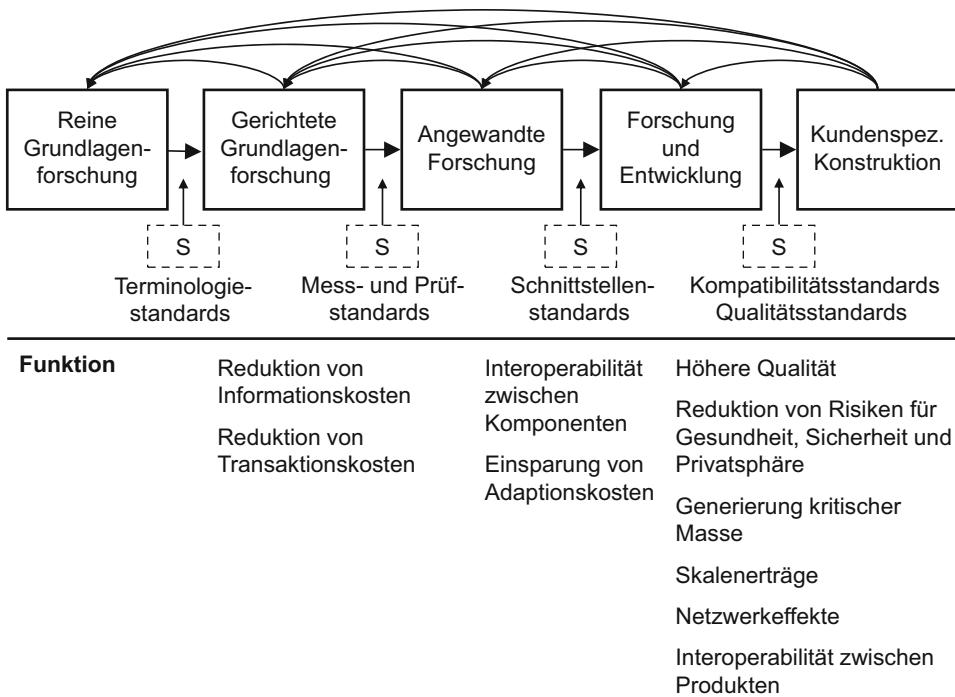


**Abb. 3.121** Nutzen von technischen Regeln in Teilprozessen (Schacht et al. 2012)

werden in verschiedenen Teilprozessen, wie in Abb. 3.121 zu erkennen ist, verwendet (Schacht et al. 2012).

Ebenso kann eine Einteilung von Normen nach ihrer Funktion in Innovationsprozessen erfolgen. Diese Einteilung und die jeweilige Anwendung im Forschungs- und Entwicklungsprozess kann Abb. 3.122 entnommen werden.

Terminologienormen erleichtern die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen Forschung, Produktentwicklung und Herstellung, Kunden und Endanwendern. Somit



**Abb. 3.122** Normen und ihre Funktionen im Innovationsprozess (Blind und Gauch 2009)

können Informations- und Transaktionskosten reduziert werden. Mess- und Prüfnormen hingegen sind Vereinbarungen über Mess- und Prüfverfahren und eine notwendige Bedingung für die Verifikation der Entwicklungsziele in komplexen Systemen. Schnittstellennormen ermöglichen die Integration von Teilkomponenten in komplexe Systeme. Kompatibilitäts- und Qualitätsnormen in der Prototypenentwicklung können als Instrument zum Schutz der Verbraucher und zur Steigerung der Akzeptanz genutzt werden (Schlüter und Behrens 2009).

Generell gilt, dass Normungs- und Standardisierungsdokumente den Stand der Technik widerspiegeln und somit eine Wissensgrundlage für Innovationen bilden (Gaub 2010). Durch bereits bestehende Normen können Innovationen beschleunigt werden, da im PEP die Experten schon frühzeitig im Dialog zusammenkommen und so Missverständnisse durch die Standardisierung von allgemein akzeptierten Modellen, Schnittstellen und Terminologiefragen verhindert werden können (Schlüter und Behrens 2009).

### 3.8.4.3 Innovation mit Normen und Standards

Die Kernaufgabe der Normung ist in den letzten Jahren durch schnelle Innovationen deutlich erweitert worden. Über die Marktfähigkeit von Innovationen muss früh nachgedacht und für ihre Umsetzung zielgerichtet gehandelt werden. Das gilt für innovative Produkte und innovative Dienstleistungen gleichermaßen. Die positiven Impulse für den Transfer



**Abb. 3.123** Die 17 Zukunftsfelder der Hightech-Strategie (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2006)

von Wissen und Technologie zum Markt durch rechtzeitige Normung und Standardisierung müssen also genutzt werden (DIN e. V. 2010b).

Mit dem im Sommer 2006 gestarteten Projekt „Innovation mit Normen und Standards“ (INS) wird diese Erkenntnis gefördert. Bei dieser Initiative wird der Schwerpunkt auf die Förderung und Marktfähigkeit von Innovationen durch Normung und Standardisierung gesetzt (Bahke 2009b; DIN e. V. 2010).

Um die Ziele des INS-Projektes zu erreichen, werden jährlich verschiedene Basisuntersuchungen zu Grundsatzthemen der Normung und Standardisierung vergeben; darüber hinaus werden jährlich ca. 40 Projekte durchgeführt, mit denen innovative Themen aus den 17 Zukunftsfeldern der Hightech-Strategie der Bundesregierung von 2006 der Normung und Standardisierung zugeführt werden (s. Abb. 3.123). Für diese Zukunftsfelder gilt (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2006): „Der Erfolg deutscher Hochtechnologieprodukte auf den Weltmärkten muss durch eine offensive Normungsstrategie unterstützt werden. Eine frühzeitige Berücksichtigung von Normungsaspekten im Forschungsprozess und bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen im Hochtechnologiebereich schafft Wettbewerbsvorteile für Deutschland.“

Besonders bewährt hat sich dieser Ansatz im Bereich der Lasertechnik. Deutschland konnte hier eine Vorreiterrolle einnehmen und neue Schlüsseltechnologien systematisch untersuchen und der Normung zuführen (Glos 2007). Ziel muss es sein, künftigen Innovationen optimale Rahmenbedingungen zu bieten und ihre Marktfähigkeit zu fördern.

### 3.8.4.4 Entwicklungsbegleitende Normung

Bereits Ende der 1980er-Jahre wurde im DIN auf Initiative führender Verbände und des Forschungsministeriums die „Entwicklungsbegleitende Normung“ (EBN) initiiert. Die EBN ist eine Dienstleistung des DIN, deren Aufgabe in der normungsbezogenen Bera-

tung und Begleitung von Innovationsprozessen besteht. Bei der Arbeit der EBN stehen drei Aspekte im Vordergrund. Erstens wird der Zeitraum der Normung und Standardisierung im Innovationsprozess nach vorn verlegt. Damit werden die strategischen Vorteile der parallelen Produktentwicklung und Produktnormung ausgeschöpft. Mit der Fertigstellung eines Produktes wird im Idealfall gleichzeitig eine fertige Norm veröffentlicht. Zweitens identifiziert die EBN frühzeitig das Normungs- und Standardisierungspotenzial von strategischen, grundlegend innovativen Produkten und Dienstleistungen. Sie leitet Normungs- und Standardisierungsprozesse ein, um drittens das Sicherstellen eines nachhaltigen Wissens- und Technologietransfers zu gewährleisten (Bahke 2012). Ebenso macht die EBN die Ergebnisse dieser Prozesse der Öffentlichkeit zugänglich. Somit kann die EBN als Schnittstelle von F&E-Prozessen zur Normung und Standardisierung, speziell ausgerichtet auf die Anforderungen innovativer Unternehmen, angesehen werden (Schlüter und Behrens 2009).

### 3.8.5 Normen und Patente

Durch die Normung wird eine planmäßige, durch die interessierten Kreise gemeinschaftlich durchgeführte Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen zum Nutzen der Allgemeinheit erreicht. Sie darf nicht zu einem Sondervorteil Einzelner führen (DIN 820, Normenreihe zur Normungsarbeit).

Dies ist Teil der allgemeinen Grundsätze der Normung (DIN 820-1 2009), wie sie die DIN 820-1:2009-05 regelt. Normen sollten daher nicht Gegenstände betreffen, auf denen Schutzrechte ruhen. Das ist in der Praxis jedoch nicht immer zu gewährleisten. Daher ist es besonders zur Innovationsförderung und für den Transfer von F&E-Ergebnissen wichtig, dass sich Patente und Normen sinnvoll ergänzen können (Bohsack 2009). Die innovationsfördernde Kombination von Normen und Patenten wird im Folgenden beschrieben.

#### 3.8.5.1 Verhältnis von Normen und Patenten im Innovationsprozess

Normung und Patentierung haben entgegengesetzte Zielsetzungen. Das Patentrecht ist für das individuelle Verwertungsinteresse bestimmt, wohingegen Normen einer kollektiven Verwendung zukommen (Blind 2009b). Patente mindern das Risiko, in eine Innovation zu investieren, indem sie dem Innovator für einen bestimmten Zeitraum und ein bestimmtes territoriales Gebiet ein Ausschließlichkeitsrecht zur Verwertung der Innovation zusprechen. Normen hingegen entsprechen einer auf Dauer angelegten Vereinheitlichung technischer Produkte und Dienstleistungen zur allgemeinen und wiederholten Nutzung. Diese Vereinheitlichung erfolgt durch öffentlich anerkannte Normungsorganisationen, in Form von formellen Normen oder durch marktdominante Unternehmen und Konsortien. Die dabei entstandene Vereinheitlichung wird als „De-facto-Norm“ bezeichnet (Erk 2009).

Ist es nicht vermeidbar oder u. U. sogar wünschenswert, dass Normen Gegenstände betreffen, auf denen Schutzrechte ruhen, so ist mit den Inhabern dieser Schutzrechte eine Vereinbarung zu treffen, die mit dem Allgemeininteresse in Einklang steht. D. h. im Allge-

meinen die Vergabe von Lizenzen unter fairen, angemessenen und nicht diskriminierenden (FRAND) Bedingungen und Konditionen (Gaub 2009a). Dabei ist wie folgt vorzugehen:

Jeder Mitarbeiter eines Normungsgremiums ist während des gesamten Normprojekts verpflichtet, ihm bekannte Patente, die im Rahmen der Anwendung der Norm betroffen sein könnten, so rechtzeitig wie möglich zu benennen. Sollten im Rahmen der Gremienarbeit patentfähige Erzeugnisse oder Verfahren entwickelt werden, so dürfen diese nicht zum Sondervorteil Einzelner angemeldet werden. Vielmehr hat der zuständige Projektbetreuer der Normungsorganisation dafür zu sorgen, dass diese Erkenntnisse unverzüglich publiziert und als Stand der Technik bekannt gemacht werden (Gaub 2009a).

Nach den Regularien der Gestaltung von Dokumenten laut DIN 820-2:2009-12 müssen alle Norm-Entwürfe auf der Titelseite folgenden Text enthalten (DIN 820-2 2009):

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

### 3.8.5.2 Identifikation von Schutzrechten und Lizenzregeln

Vor der endgültigen Herausgabe einer Norm ist zu klären, ob Schutzrechte identifiziert worden sind, die Inhalte der Norm betreffen. Wurden keine derartigen Schutzrechte identifiziert, so wird die Norm mit dem Zusatz herausgegeben, dass Inhalte der Norm Schutzrechten unterliegen können und dass es nicht in der Verantwortung des Normungsinstituts liegt, alle Patentrechte zu identifizieren. Wurden jedoch Schutzrechte identifiziert, so muss die Klärung der Lizenzierungsfrage vor der Veröffentlichung der Norm erfolgen. Der Schutzrechtinhaber wird dazu rechtzeitig vor Erscheinen der Norm informiert und zur Klärung der Lizenzierungsfrage gebeten, eine schriftliche Erklärung vor der Veröffentlichung der Norm abzugeben. Dabei können die folgenden Fälle eintreten:

- gebührenfreie Lizenz: Der Schutzrechtinhaber räumt jedem Dritten eine nicht exklusive, zeitlich unbegrenzte und gebührenfreie Lizenz zu fairen, angemessenen, nicht diskriminierenden Bedingungen und Konditionen ein.
- entgeltliche Lizenz: Der Schutzrechtinhaber beabsichtigt, Dritten eine nicht exklusive, zeitlich unbegrenzte Lizenz zu fairen, angemessenen, nicht diskriminierenden Bedingungen und Konditionen zu erteilen, wobei die Höhe der Lizenzgebühr branchenüblich sein muss. An Stelle der Zahlung einer Lizenzgebühr kommt auch die Möglichkeit einer Lizenznahme an einem Schutzrecht des Dritten in Frage (Kreuzlizenz).
- keine Einwilligung: Der Schutzrechtinhaber ist nicht gewillt, Lizenzen zu vergeben. Dann darf die Norm mit den geschützten Inhalten nicht veröffentlicht werden oder muss, wenn schon veröffentlicht, zurückgezogen werden.

Konnte eine Einigung über die Lizenzierungsfrage erzielt werden, so wird auf dem Deckblatt der Norm darauf hingewiesen, dass die Anwendung dieser Norm die Verwendung von

patentierten oder andersartig geschützten Inhalten bedeuten kann. Weiterhin wird darauf verwiesen, dass der Patentinhaber eine Erklärung gegenüber dem Normungsinstitut abgegeben hat, dass er über gebührenfreie Lizenzen oder solche zu fairen, vernünftigen und nicht diskriminierenden Geschäftsbedingungen mit Antragstellern in der ganzen Welt verhandeln wird. Folglich werden auch die Kontaktdaten des Patentinhabers angegeben.

**Europäische und internationale Regelungen** Auf internationaler Ebene regelt die ISO/IEC/ITU Common Patent Policy (ISO [isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/3770791/Common\\_Policy.htm](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/3770791/Common_Policy.htm)) aus dem Jahr 2006 die Vorgehensweise zu Normen und Patenten. Diese Richtlinie wurde auf europäischer Ebene 2009 überarbeitet und den europäischen Bedürfnissen angepasst. Die Überarbeitung resultierte im CEN/CENELEC Guide 8 und wurde 2010 publiziert (CEN/CENELEC 2010).

### 3.8.5.3 Strategische Kombinationen von Normen und Patenten

Grundsätzlich stellt sich jedem Unternehmen die Frage, inwieweit und zu welchen Zeitpunkten im Innovationsprozess Patente und Normen gemeinsam verwendet werden sollen und sich in ihrer strategischen Auswirkung ergänzen können.

Ein Hinderungsgrund, die Normung frühzeitig in die innovative Produktentwicklung oder gar in die Forschung einzubinden, besteht in den zeitlichen Differenzen der beiden Verfahren. Heutige Innovationszyklen werden immer kürzer, wohingegen die traditionelle Normung im Durchschnitt 3 Jahre benötigt, um eine Norm zur Veröffentlichung zu bringen. Da der strategische Aspekt der Normung jedoch immer mehr an Bedeutung und Anerkennung gewinnt, wurden auch die Prozesse der Normung umgestellt, um in kürzeren Verfahren allgemeingültige Vereinheitlichungen festlegen zu können, s. Abschn. 3.8.1.5. Auch ist der monetäre Gesichtspunkt nicht zu vernachlässigen. Der Nutzen, der sich aus einem Patent generieren lässt, ist wesentlich offensichtlicher und leichter zu berechnen als der Nutzen, der aus der Beteiligung an der Normung entsteht. Dieser vermeintliche Vorteil der Patentierung geht jedoch auch mit einer anderen Risikoverteilung einher. Wird ein Patent nicht erfolgreich genutzt, kann kein monetärer Nutzen erwirtschaftet werden. Eine Norm wird dagegen durch eine gewisse Allgemeingültigkeit unterstützt. Das Risiko, dass das Wissen in einer Norm nicht angewendet wird, ist somit viel geringer. Die jeweilige Bevorzugung einer eher patentierungs- oder mehr normungslastigen IP (Intellectual Property)-Strategie ist somit abhängig von vielen Faktoren, wie u. a. Unternehmensgröße, Branchenzugehörigkeit und Spezifikation des Wissens. Normen werden strategisch dafür eingesetzt, Märkte für innovative Produkte und Dienstleistungen durch Gemeinschaftsmerkmale zu schaffen, zu öffnen und zu vergrößern, während Patente dazu dienen, die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens auf diesen Märkten durch Alleinstellungsmerkmale zu sichern.

Nicht zu vernachlässigen ist die Tatsache, dass Normen und Patente gleichermaßen zum Wirtschaftswachstum beitragen (Blind 2009a). Das zeigt auf, dass das Zusammenspiel und die strategische Kombination von Normung und Patentierung der Grundgedanke einer Innovationsstrategie (Gaub 2009b) in jedem Unternehmen sein muss.

Um die Verknüpfung von Normen und Patenten weiter zu erforschen, wurde in 2010 im Rahmen des INS-Projekts (s. Abschn. 3.8.4) die Basisuntersuchung „Identifikation

zukünftiger Standardisierungsfelder – Die Interrelation zwischen Patenten und Normen“ (Blind 2009b) durchgeführt. Die Ziele dieser Untersuchung waren:

1. Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens der Interrelation zwischen Patenten und Normen
2. Indikatorenbasiertes Mapping des Verhältnisses zwischen Patenten und Normen, differenziert nach Technologie- bzw. Normungsfeldern
3. Identifikation der Interaktion zwischen Patentierungs- und Normungsstrategien von Unternehmen
4. Ableitung von Handlungsempfehlungen bezüglich zukünftiger patentdominierter Standardisierungsfelder für das DIN, für Unternehmen, für das Deutsche Patent- und Markenamt und für das Europäische Patentamt.

In Zukunft wird sich die bisher noch in DIN 820-1:2009-05 enthaltene Forderung, dass Normen nur in Ausnahmefällen patentierte Inhalte enthalten sollten, nicht mehr aufrechterhalten lassen. Vielmehr wird eine sinnvolle strategische Kombination von Normen und Patenten im Innovationsprozess empfohlen werden, um durch Normen Märkte für innovative Produkte und Dienstleistungen zu öffnen und durch Patente Wettbewerbsvorteile auf diesen Märkten zu sichern.

### **3.8.6 Normung als strategisches Instrument**

Die Normung stellt ein bedeutendes strategisches Instrument dar, welches u. a. die Markt-fähigkeit von Innovationen fördert, internationale Märkte öffnet, Kosten senkt (Gaub 2009a) und Rechtssicherheit bietet. Durch die aktive Teilnahme an der Normung wird ein Unternehmen in die Lage versetzt, sich Wissens- und Zeitvorteile gegenüber anderen Marktteilnehmern zu verschaffen. So können zum einen eigene Interessen einfließen, zum anderen kann schon frühzeitig auf Auswirkungen von Normen reagiert werden. Bei der Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen ist daher eine direkte Berücksichtigung der Normeninhalte realisierbar, was einem nicht beteiligten Dritten ungleich schwerer fallen würde. Er müsste die Normen erst nachträglich auf seine Produkte anwenden. Eine verspätete Umstellung mit zusätzlichen Kosten und hohem Zeitaufwand wäre für ihn die Folge. Eine direkte und frühzeitige Involvierung in die Normung von Seiten eines Unternehmens kann dessen F&E-Kosten somit deutlich mindern.

Weiterhin ermöglichen Normen und Spezifikationen eine internationale Kommunikation auf einheitlicher Basis. Beispielhaft sei hier auf das weltweite System der Einheiten physikalischer Größen verwiesen, welches es Wissenschaftlern und Technikern erlaubt, sich mit Hilfe einer genormten Terminologie zu verständigen (Bahke 2010).

Ferner tragen Normen dazu bei, Handelshemmnisse abzubauen und somit den globalen Handel zu stärken. Es entstehen neue Märkte oder bestehende werden erweitert. In diesem Zusammenhang kommt es zu deutlich sinkenden Transaktionskosten, z. B. durch

die Verwendung von genormten Containern. Fest definierte Normen und Spezifikationen für Systemabgrenzungen sorgen für klare und eindeutige Prozesse und verhindern deren Ausuferung oder die Entstehung mehrerer „Parallelwelten“. Letztlich führt die Minde rung dieser Vielfalt zu reduzierten Anpassungskosten und schließlich zu einer optimierten Wertschöpfungskette.

Auch aus Verbraucherperspektive lassen sich Normen vorteilhaft verwenden. So erleichtern sie dem Verbraucher die Entscheidungsfindung hinsichtlich eines Produktes oder einer Dienstleistung, da sie Qualität und Leistung vergleichbar machen. Weiterhin dienen sie in nicht unerheblichem Maße der Sicherheit und verhindern Unfälle, wie etwa im Falle von Materialprüfungsnormen (z. B. Laserpointer).

Hervorzuheben ist ebenfalls die Wettbewerbsförderung mit Hilfe von Normen, da sie auch kleinen Volkswirtschaften den Zugang zu Märkten und innovativer Technik gewährleisten (Bohnsack 2009). Um sich nun in diesem Rahmen von anderen Konkurrenten abzuheben, somit mehr Kunden zu gewinnen und den Marktanteil zu steigern, sind Innovationsfähigkeit und die Umsetzung neuer Technologien in marktfähige Produkte gefragt (Bahke 2009b). Zumeist gehen beide Aspekte mit einer Rationalisierung aller Prozesse einher. Zusammen genommen bewirkt die Normung somit eine Qualitätsverbesserung insbesondere im Umfeld von Wirtschaft, Wissenschaft, Gesellschaft und Staat (Bahke 2010). Einen besonders wichtigen Stellenwert im Hinblick auf die Allgemeinheit nehmen die Normung und Standardisierung in den Bereichen Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und Umweltschutz ein.

Perspektivisch gesehen ist davon auszugehen, dass die Bedeutung von Normen und Normung weiter steigen wird, besonders durch die verstärkte Anwendung von deregulierenden Konzepten in der europäischen Rechtsetzung. So hat die Politik der aktuellen (2012) Bundesregierung die Bedeutung der Normung erkannt (z. B. Hightech-Strategie 2006, normungspolitisches Konzept der Bundesregierung 2009), und die EU veröffentlicht als Gesetzgeber sicherheitstechnische Richtlinien, die im weiteren Verlauf durch Normen konkretisiert werden. Somit tragen diese sowohl zur Staatsentlastung als auch zur Rechtssicherheit bei.

Deutschland als eines der wichtigsten Mitgliedsländer der EU nimmt hier auch in der Normung eine Vorreiterrolle ein. Es ist das Land mit den meisten Sekretariaten von Technical Committees (TC) und Sub Committees (SC) im CEN und CENELEC. Global betrachtet haben nur die USA eine vergleichbar hohe Möglichkeit der Einflussnahme auf Normung und Standardisierung in der ISO und der IEC. Nicht zuletzt auch dadurch erklärt sich die gute nationale und internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft (Bahke 2009c).

### 3.8.6.1 Die Deutsche Normungsstrategie

Die Deutsche Normungsstrategie (DNS) wurde in den Jahren 2003 und 2004 von Repräsentanten aus Wirtschaft, Politik, Forschung und Normung erarbeitet und soll als „lebendes Dokument“ verstanden werden, das durch die interessierten Kreise und die Normungsorganisationen mit Leben gefüllt und fortentwickelt wird. Das DIN ist einer von vielen Partnern in der Umsetzung der Strategie. Die Deutsche Normungsstrategie gibt dem DIN

die Richtung für alle weiteren strategischen Entscheidungen vor und ist die Grundlage für Umsetzungsmaßnahmen und daraus abgeleitete operative Aktionen. Weiterhin richtet die Deutsche Normungsstrategie die deutsche Normungsarbeit neu aus und beachtet dabei besonders die zunehmende Globalisierung sowie die sich stetig wandelnden Anforderungen der Gesellschaft und der Märkte (DIN e. V. 2004).

Aufgrund vieler Impulse wurde die Deutsche Normungsstrategie Anfang 2010 überarbeitet (DIN e. V. 2010a). Dabei bleiben die fünf Ziele bestehen, jedoch werden innerhalb dieser Ziele aktuelle Themen aufgegriffen und konkretisiert. Folglich leiten sich daraus weitere Maßnahmen und Aktionen für die interessierten Kreise ab, um den Fokus auf aktuelle Themen zu lenken und die Ziele der DNS fortzuschreiben.

„Normung und Standardisierung in Deutschland dienen Wirtschaft und Gesellschaft zur Stärkung, Gestaltung und Erschließung regionaler und globaler Märkte.“ Dieser Vision dienen die fünf Ziele der Deutschen Normungsstrategie von 2004 und ihrer Aktualisierung von 2010 sowie eine Reihe von konkreten Maßnahmen und Aktionen zur Erreichung der Ziele:

*Ziel 1* Normung und Standardisierung sichern Deutschlands Stellung als eine der führenden Wirtschaftsnationen

Im Brennpunkt:

- Normung und Standardisierung verstärkt am Marktinteresse ausrichten,
- Innovationen fördern,
- internationale Ausrichtung priorisieren,
- KMU im globalen Markt unterstützen,
- nachhaltige Entwicklung sicherstellen und
- Normung, Standardisierung und Patentwesen integrativ nutzen.

*Ziel 2* Normung und Standardisierung unterstützen als strategisches Instrument den Erfolg von Wirtschaft und Gesellschaft

Im Brennpunkt:

- Wettbewerbsfähigkeit der KMU fördern,
- Netzwerke und Plattformen verstärkt nutzen,
- Normung und Standardisierung in das Bildungssystem integrieren
- Managementsystemnormung bedarfsgerecht steuern und
- Normen und Standards verstärkt im öffentlichen Auftragswesen nutzen.

*Ziel 3* Normung und Standardisierung entlasten die staatliche Regelsetzung

Im Brennpunkt:

- Optimale Rahmenbedingungen schaffen,
- Mandatserarbeitung mitgestalten,
- neue Konzeption ausweiten,

- Spezifikationen der Normung zuführen und
- weltweite Angleichung der technischen Regulierung unterstützen.

*Ziel 4* Normung und Standardisierung sowie die Normungsorganisationen fördern die Technikkonvergenz

Im Brennpunkt:

- Das europäische Normungssystem aktiv mitgestalten,
- innovative Technikbereiche verstärkt anbinden und
- gewonnene Erfahrungen in das internationale Normungssystem einbringen.

*Ziel 5* Die Normungsorganisationen bieten effiziente Prozesse und Instrumente an

Im Brennpunkt:

- Qualitätssicherung intensivieren und Dienstleistungen ausbauen,
- Geschäftsmodell überprüfen,
- Beteiligung „aller“ sicherstellen,
- Zugang für KMU verbessern,
- Marketing der Normen und Spezifikationen optimieren und
- Kohärenz des Normenwerks sicherstellen.

Die Umsetzung der Deutschen Normungsstrategie außerhalb der Normungsorganisationen DIN und DKE erfolgt seitens der öffentlichen Hand durch das Normungspolitische Konzept der Bundesregierung vom September 2009 und seitens der Wirtschaft durch das Positionspapier des BDI vom April 2008 sowie durch Strategiepapiere anderer Branchenverbände, wie in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

### **3.8.6.2 Das Normungspolitische Konzept der Bundesregierung**

Durch das Normungspolitische Konzept der Bundesregierung wird ein koordiniertes Vorgehen der Bundesregierung ermöglicht, um Normung und Standardisierung als integralen Bestandteil der Wirtschafts- und Innovationspolitik weiter zu stärken. Besonders in der Mittelstandsinitiative und der Hightech-Strategie kann sich die Normung als marktnahes strategisches Instrument beweisen (Gaub 2009b), um die Umsetzung und Verbreitung von Innovationen und Forschungsergebnissen nachhaltig zu unterstützen (DIN e. V. 2010c). Die Normung unterstützt die Schaffung und Öffnung von Märkten und den Wissens- und Technologietransfer in diese Märkte. Daher ist es notwendig, dass die Normung die wirtschaftspolitischen Ziele der Bundesregierung unterstützt. Jedoch ist es unerlässlich, dass die Normung weiterhin privatwirtschaftlich organisiert bleibt. Denn nur so kann die Normung einen wesentlichen Beitrag zur Deregulierung leisten (Gindele 2009).

Die Bundesregierung hat ihr Normungspolitisches Konzept im September 2009 beschlossen und darin ihre normungspolitischen Ziele, Umsetzungsmaßnahmen der Ressorts sowie ihre Erwartungen an die Normungsorganisationen (DIN e. V. 2010c) formuliert. Die Ziele bauen auf der Deutschen Normungsstrategie auf und konkretisieren und ergänzen inhaltlich den Normenvertrag von 1975.

### 3.8.6.3 Normungsstrategie des BDI

Da die Industrie entscheidend an der Normung beteiligt ist, hat der Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) ein Positionspapier verfasst, um einen Beitrag zur Konkretisierung der Deutschen Normungsstrategie zu leisten. Das Engagement der Industrie soll auch in Zukunft weitergeführt werden, denn nur durch eine aktive Mitarbeit kann die Industrie ihre Interessen in die Normung einbringen. Auch will die Industrie dadurch eine Eigenverantwortung wahrnehmen, um die Normungsergebnisse und die Normungspolitik mitzugestalten und die Normung zu stärken (BDI e. V. 2008).

### 3.8.6.4 ISO-Strategie 2011–2015

Das ganzheitliche Ziel der ISO-Strategie ist die Unterstützung der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung (ISO 2010). Da die Ziele und Vorgaben der ISO-Strategie 2005–2010 weitgehend umgesetzt werden konnten, erfolgt aktuell eine Überprüfung und Fortschreibung der strategischen Ziele ab 2011 (Bahke 2009c).

Die Kernthemen der ISO-Strategie 2011–2015 sind folgende:

- Innovation,
- Technikkonvergenz (World Standards Cooperation),
- Zusammenarbeit mit anderen Regelsetzern,
- Zusammenarbeit mit Foren und Konsortien,
- beschleunigte Verfahren (Fast-Track),
- Deregulierung – Harmonisierung von Rechtsvorschriften (Modellprojekte UN/ECE) und
- Behandlung gesellschaftlicher Themen (z. B. Social Responsibility).

### 3.8.6.5 Einbindung von KMU in Normungsprozesse

Eine wichtige Aufgabe im Umfeld von Normung und Standardisierung ist die Identifikation des Informationsbedarfs von KMU im Bereich der Normen und der Normung sowie die Einbindung der KMU in die Normungsaktivitäten.

Durch schnelle Innovationen ist die Kernaufgabe der Normungsorganisationen, die Normung und Standardisierung von Produkten und Dienstleistungen, in den letzten Jahren deutlich erweitert worden. Insbesondere im Hinblick auf die fortschreitende Globalisierung der Märkte können Normen den Marktzugang innovativer Produkte fördern und sichern. Der Normennutzen für die Gesamtwirtschaft Deutschlands wird derzeit mit rund 1 % des Bruttoinlandsproduktes (ca. 20 Mrd. € in 2009) beziffert. Doch was bedeutet das in der Praxis? Welche Unternehmen nutzen das strategische Potenzial der Normen? Die Untersuchung „Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards“, die 2006 und 2007 im Rahmen der Initiative „Innovation mit Normen und Standards“ (INS) vom Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal (Bormann et al. 2007) durchgeführt wurde, hat gezeigt, dass Großunternehmen im Allgemeinen einen Innovationsvorsprung gegenüber kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) haben, da sie neue Normen eher begleiten und anwenden und somit das Potenzial, das die Normung bietet, besser ausnutzen können. Dieser Innovationsvorsprung erleichtert den Marktzugang für innovative

Produkte und Dienstleistungen von Großunternehmen. Zusätzlich werden von den Unternehmen Normen zur Marktpräparation genutzt, eine Nichtteilnahme an der nationalen Gremienarbeit und der internationalen Normung kann somit zu Marktnachteilen führen. Bei kleinen und mittelständischen Unternehmen führt häufig fehlendes Bewusstsein über den Nutzen und das strategische Potenzial der Normung dazu, dass mögliche Vorteile nicht ausgeschöpft werden können. Über das fehlende Bewusstsein hinaus hindern fehlende personelle und finanzielle Kapazitäten die KMU daran, die Normungsaktivitäten dauerhaft zu beobachten oder sich gar aktiv daran zu beteiligen. Diese Problematik ist bei Mikrounternehmen (<10 Mitarbeiter), wie sie häufig im Handwerk und bei innovativen Startups zu finden sind, noch gravierender. Hier ist häufig schon die Information darüber, wo aktuelle Normen zu beziehen sind und wie deren Aktualität im Unternehmen sichergestellt werden kann, nicht vorhanden. Den Branchen- und Fachverbänden kommt hier eine besondere Verantwortung zu, diese Defizite bei ihren Mitgliedsunternehmen zu beseitigen.

Aufgrund der oben beschriebenen Problematik muss es das Ziel sein, das Bewusstsein bei KMU für die Normung zu wecken, den KMU, insbesondere den Mikrounternehmen, Informationen in geeigneter Weise zugänglich zu machen und sie im Bereich der Normungsarbeit zu unterstützen. Im Rahmen der bereits erwähnten Basisuntersuchung „Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards“ (Bormann et al. 2007) wurden einige Handlungsempfehlungen ausgesprochen, deren Umsetzbarkeit in einem Folgeprojekt geprüft wurde. Das Projekt „Einbindung von kleinen und mittelständischen Unternehmen in Normungsprozesse“ wurde in den Jahren 2008 und 2009 von der TU Clausthal (Bessling et al. 2009) durchgeführt. Dabei sollten geeignete Konzepte erarbeitet werden, den Informationsbedarf der KMU in Bezug auf Normung zu decken und die Unternehmen in die Normungsaktivitäten stärker einzubinden. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden hierzu Ansätze ausgewählt, die anhand eines Testbetriebs evaluiert und ausgewertet wurden. Es war zu ermitteln, wo der Informationsbedarf der KMU liegt und wie dieser gedeckt werden kann, wo und in welcher Form Informationsmaterial bereitgestellt werden sollte und vor allem, wie die Interessenvertretung der KMU in Normungsgremien und die Einbindung der KMU in den europäischen und internationalen Normungsprozess realisiert werden kann. Zudem wurden die Möglichkeiten der Aus- und Weiterbildung sowie mögliche Anreizsysteme untersucht und notwendiges Informationsmaterial erstellt.

---

### **3.9 Patente und gewerbliche Schutzrechte im Produktentstehungsprozess (Patrick Erk)**

#### **3.9.1 Einleitung**

Die zunehmende Bedeutung von Patenten für den Schutz neu entwickelter Produkte spiegelt sich in international stark gestiegenen Anmeldezahlen wider. Doch nicht nur Patente, sondern auch die übrigen gewerblichen Schutzrechte – Gebrauchsmuster, Geschmacksmuster und Marken – können helfen, die eigenen Innovationen gegen Nachahmer zu schützen.

Die gewerblichen Schutzrechte ergänzen und unterstützen unternehmerische Maßnahmen wie die Geheimhaltung von Know-how oder eine schnelle Marktreife bzw. -einführung neuer Technologien.

Die Auswirkungen von Patenten auf die Entwicklung neuer Produkte sind nicht auf den Schutz des Entwicklungsergebnisses beschränkt: Patentveröffentlichungen liefern Informationen über bereits bestehende technische Problemlösungen und über das Innovationsverhalten von Wettbewerbern oder auf einem technologischen Gebiet. Fremde Patente können der Nutzung eigener Entwicklungsergebnisse entgegenstehen.

Dieses Kapitel versucht, Orientierung über die gewerblichen Schutzrechte und ihre Nutzung zu geben und die für ihren wirtschaftlich sinnvollen Einsatz notwendigen Grundlagen zu vermitteln.

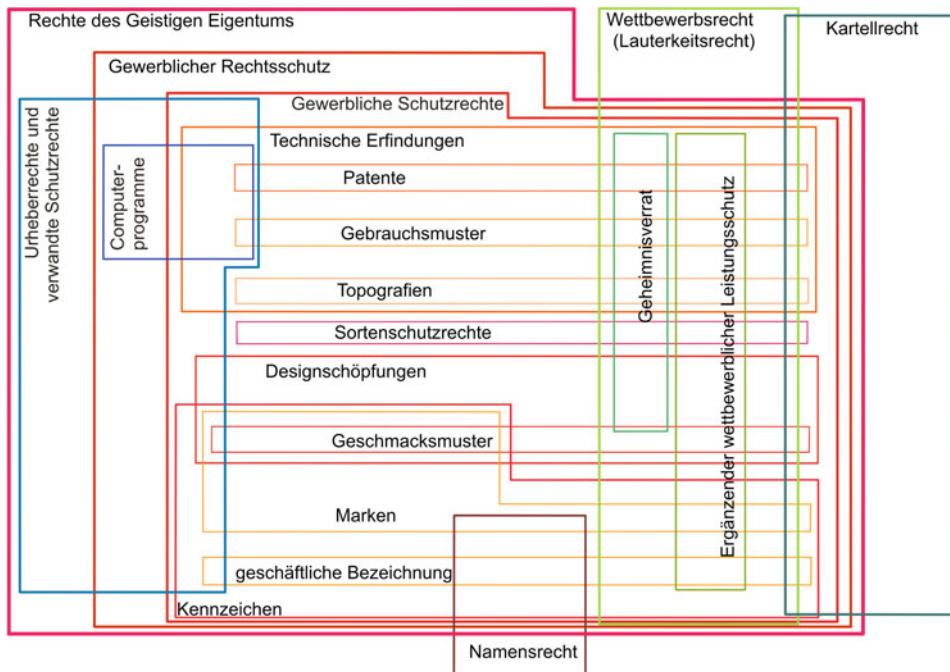
### **3.9.2 Grundlagen**

Dem Schöpfer einer geistigen Leistung, beispielsweise eines künstlerischen oder literarischen Werkes oder einer gewerblich verwertbaren technischen oder ästhetischen Schöpfung, wird nahezu in allen Ländern ein besonderes, eigentumsähnliches Recht an seiner Leistung in Form eines zeitlich begrenzten, frei übertragbaren Ausschließlichkeitsrechts zuerkannt. Das Ausschließlichkeitsrecht erlaubt es dem Schöpfer, Unbefugten die Verwertung seiner Schöpfung zu verbieten.

Das Ausschließlichkeitsrecht verleiht dem Schöpfer eine monopolartige Stellung, die es ihm erlaubt, am Markt einen höheren Preis für seine Schöpfung zu erzielen, als dies bei ihrer freien Verwertbarkeit der Fall gewesen wäre. Der höhere Preis macht die in die Schöpfung geflossenen Investitionen weniger riskant. Das verringerte Renditenrisiko stellt einen Ansporn dar, Investitionen in neue Schöpfungen zu tätigen.

Das Ausschließlichkeitsrecht und dessen Übertragbarkeit tragen zunächst nur dem Verwertungs- und Alleinstellungsinteresse des Schöpfers Rechnung, nicht jedoch dem Interesse der Allgemeinheit an einer freien Nutzung der Schöpfung. Um diese beiden widerstrebenden Interessen auszugleichen, wird das Ausschließlichkeitsrecht nur für Schöpfungen mit einem Mindestmaß an schöpferischer Leistung und nur für begrenzte Zeit verliehen.

Ein weiterer Interessensaustausch erfolgt dadurch, dass die Ausschließlichkeitsrechte zumindest bei gewerblich verwertbaren Schöpfungen einen ständigen Innovationsdruck auf die Wettbewerber erzeugen und somit eine stete Verbesserung der auf dem Markt verfügbaren Waren und Dienstleistungen erzwingen. Anstatt in einen über den Preis ausgetragenen Imitationswettbewerb werden die Marktteilnehmer in einen Substitutionswettbewerb gedrängt, in dem konkurrierende, eigenständige Innovationen um Abnehmer kämpfen. Ein Imitationswettbewerb ist dennoch nicht völlig ausgeschlossen: Er findet statt, wenn die Ausschließlichkeitsrechte aufgrund ihrer zeitlichen Beschränkung wegfallen sind und die Innovation durch jedermann frei genutzt werden kann.



**Abb. 3.124** Überblick über das System der Geistigen Eigentumsrechte und des Gewerblichen Rechtsschutzes

### 3.9.3 Überblick über den Gewerblichen Rechtsschutz

Der Gewerbliche Rechtsschutz bildet, wie Abb. 3.124 zeigt, ein Teilgebiet der Rechte zum geistigen Eigentum. Während die geistigen Eigentumsrechte mit dem Urheberrecht und den verwandten Rechten auch Werke der Kunst und Literatur erfassen, beschränkt sich der Gewerbliche Rechtsschutz auf gewerblich verwertbare Schöpfungen, die sich durch besondere Eigenarten auszeichnen und denen abhängig von ihrer Eigenart bestimmte gewerbliche Schutzrechte zugeordnet sind:

- Technische Erfindungen können durch Patente, Gebrauchsmuster und Topografien,
- ästhetische Formschöpfungen durch Geschmacksmuster und
- Kennzeichen für Waren, Dienstleistungen und Unternehmen durch Marken und als Unternehmenskennzeichen unter Schutz gestellt werden.

Überschneidungen der gewerblichen Schutzrechte bestehen mit dem Urheberrecht, insbesondere bei Geschmacksmustern sowie technischen Zeichnungen und Computerprogrammen, und mit dem Wettbewerbsrecht beim ergänzenden wettbewerblichen Leistungsschutz, der die wettbewerbliche Eigenart von Erzeugnissen aufgrund besonderer äußerer Alleinstellungsmerkmale erfasst. Die Ausübung des Ausschließlichkeitsrechts kann in Einzelfällen

**Tab. 3.8** Gemeinsame Grundsätze von gewerblichen Schutzrechten

Grundsatz	Beschreibung
Ausschließlichkeit	Nur der Inhaber des gewerblichen Schutzrechtes ist berechtigt, den hierdurch geschützten Gegenstand zu benutzen
Antragsgrundsatz	Das Schutzrecht kann nur erwerben, wer es bei der zuständigen Behörde seines Landes beantragt. Ausnahmen bestehen lediglich bei Geschmacksmustern und Marken, an denen in einigen Ländern Rechte durch Benutzung erworben werden können
Territorialitätsprinzip	Die Voraussetzungen, Wirkungen, Dauer und Inhaberschaft richten sich nach dem jeweiligen Landesrecht. Gegen Handlungen, die keinen Bezug zum Land, in dem das Schutzrecht besteht, haben, kann nicht vorgegangen werden <sup>a</sup>
Prioritätsprinzip	Bei mehreren unabhängigen Schutzrechten setzt sich das Schutzrecht mit dem älteren Zeitrang (der älteren Priorität) durch. Der Zeitrang eines Schutzrechtes wird durch seinen Anmeldetag <sup>b</sup> bestimmt („first to file“). Eine Nachanmeldung für denselben Schutzgegenstand kann den Anmeldetag der ersten Anmeldung als Priorität beanspruchen, wenn die Nachanmeldung innerhalb einer bestimmten (Prioritäts-)Frist eingereicht wird
Übertragbarkeit	Das Schutzrecht kann verkauft, verliehen, lizenziert und vererbt werden
Wagnischarakter	Ein Schutzrecht kann widerrufen werden, wenn es sich als nicht rechtsbeständig erweist, und gewährt somit nur einen wahrscheinlichen Schutz
Verlängerungsgebühren	Damit das Schutzrecht nicht vor Erreichen seiner Höchstlaufzeit erlischt, muss der Anmelder oder Inhaber regelmäßig Verlängerungsgebühren entrichten

<sup>a</sup>So kann der Inhaber eines nur in einem Land A wirksamen Patents nicht gegen die Herstellung, das Angebot oder den Verkauf eines patentverletzenden Erzeugnisses in einem Land B vorgehen, es sei denn, Angebot oder Verkauf erfolgen aus dem Land A oder in das Land A. Ein ausreichender Bezug zum Land A kann sich auch durch Bewerbung im Internet, insbesondere in der Landessprache A, oder bei einem Transport durch das Land A ergeben.

<sup>b</sup>In einigen wenigen Ländern, vorrangig (bis März 2013) den USA, bestimmt sich der Zeitrang z. B. eines Patents nicht nach dem Anmeldetag, sondern nach dem Tag, an dem die Erfindung reif zur Umsetzung in die Praxis war („first to invent“).

einen Missbrauch einer marktbeherrschenden Stellung seines Inhabers darstellen und somit kartellrechtswidrig sein.

Die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Elemente des gewerblichen Rechtsschutzes sind im Folgenden kurz erläutert.

### 3.9.3.1 Grundprinzipien der gewerblichen Schutzrechte

Die gewerblichen Schutzrechte beruhen auf gemeinsamen Prinzipien (Tab. 3.8). Durch eine Vielzahl von internationalen Abkommen sind Mindeststandards für die Verfahren zur Erlangung und Durchsetzung der gewerblichen Schutzrechte, die von ihnen erfassbaren

Schutzgegenstände und verliehenen Rechte festgelegt. Trotz der weiterhin andauernden Harmonisierungsbemühungen muss vom Grundsatz her in jedem Staat um ein separates, nationales Schutzrecht nach den dort geltenden Verfahrensregeln nachgesucht werden, was meist mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Nur in wenigen Fällen ist es aufgrund von internationalen Abkommen möglich, ein Schutzrecht gleichzeitig für mehrere Staaten durch ein einziges zentrales Verfahren zu erlangen.

Die möglichen Ansprüche des Schutzrechtsinhabers gegenüber Nachahmern bzw. Verletzern, die ohne seine Zustimmung den Gegenstand des Schutzrechts benutzen<sup>1</sup>; sind in Tab. 3.9 zusammengefasst. Ob diese Ansprüche gegen den Verletzer tatsächlich bestehen oder durchgesetzt werden können, entscheidet sich nach den Umständen des Einzelfalls und dem jeweils geltenden nationalen Recht.

Dem Inhaber eines Schutzrechtes steht trotz des ihm verliehenen Ausschließlichkeitsrechtes nicht notwendigerweise ein Anspruch auf Nutzung seiner geschützten Erfindung zu. An einer solchen Nutzung kann er beispielsweise gehindert sein, wenn die Verwertung der Erfindung gegen ein Gesetz verstößen oder prioritätsältere Schutzrechte Dritter verletzen würde.

Dem Schutzrechtsinhaber sind mit den Ansprüchen nach Tab. 3.9 wirksame Mittel zur Verteidigung seiner Erfindung gegen eine unbefugte Benutzung durch Nachahmer an die Hand gegeben. Die Geltendmachung und Durchsetzung dieser Ansprüche in außergerichtlichen Verhandlungen oder gerichtlichen Verfahren ist allerdings nicht selten mit einem zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand seitens des Schutzrechtsinhabers verbunden. Zudem bergen solche Auseinandersetzungen Risiken nicht nur für den Nachahmer, sondern auch für den Schutzrechtsinhaber, sollte sich beispielsweise das Schutzrecht im Laufe der Auseinandersetzung als nicht beständig oder das vermeintlich nachgeahmte Produkt nicht als Verletzung erweisen.

### 3.9.3.2 Übersicht über die gewerblichen Schutzrechte

Der folgende Überblick orientiert sich an den von den Mitgliedsstaaten der Welthandelsorganisation vereinbarten Mindeststandards bei den einzelnen gewerblichen Schutzrechten.<sup>2</sup>

#### Patente

Patente gewähren Schutz für Erzeugnisse und Verfahren, die gewerblich verwertbar und neu sind und auf einer erforderlichen Tätigkeit beruhen (Tab. 3.8). Als „Erzeugnisse“ gelten neben Vorrichtungen auch Stoffe und Stoffgemische, als „Verfahren“ neben Arbeits- und Herstellverfahren auch eine neue Verwendung von an sich bekannten Vorrichtungen,

<sup>1</sup>Als Benutzung zählen das Herstellen, Anbieten, Inverkehrbringen, Gebrauchen und die Einfuhr zu diesen Zwecken der vom Schutzrecht unter Schutz gestellten Schöpfung.

<sup>2</sup>Diese Mindeststandards sind vereinbart im TRIPS-Abkommen („Agreement on Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights“). Informationen über das TRIPS-Abkommen sind abrufbar unter [www.wto.org/english/tratop\\_E/TRIPS\\_e/trips\\_e.htm](http://www.wto.org/english/tratop_E/TRIPS_e/trips_e.htm).

**Tab. 3.9** Ansprüche des Inhabers eines gewerblichen Schutzrechtes gegen Verletzer

Anspruch	Wirkung
Vorlage- und Besichtigungsanspruch	Vorlage von Urkunden und Bank-, Finanz- und Handelsunterlagen; Besichtigung von Sachen oder Verfahren, um die Schutzrechtsverletzung feststellen zu können
Unterlassungsanspruch	Verbot der schutzrechtsverletzenden Handlung, auch vorbeugend vor ihrer Durchführung
Auskunftsanspruch	Auskunft über Ursprung und Vertriebswege sowie Mengen- und Preisangaben der schutzrechtsverletzenden Waren oder Dienstleistungen einschließlich Namen und Adressen gewerblicher Abnehmer; Vorlage von Bank-, Finanz- und Handelsunterlagen
Schadensersatzanspruch	Ersatz des aufgrund der Schutzrechtsverletzung entstandenen Schadens, z. B. in Form des dem Schutzrechtsinhaber entgangenen Gewinns, der Herausgabe des beim Verletzer durch die Schutzrechtsverletzung entstandenen Gewinns oder einer Lizenzgebühr
Veröffentlichungsanspruch	Veröffentlichung der Gerichtsentscheidung auf Kosten des Verletzers, im Einzelfall auch Schaltung entsprechender Anzeigen
Vernichtungsanspruch	Vernichtung der sich im Besitz oder Eigentum des Verletzers befindlichen schutzrechtsverletzenden Erzeugnisse oder der unter Verwendung eines geschützten Verfahrens hergestellten Erzeugnisse sowie sich im Eigentum des Verletzers befindlicher Materialien und Geräte zur Herstellung dieser Erzeugnisse; Rückruf der patentverletzenden Erzeugnisse oder endgültige Entfernung aus den Vertriebswegen
Beschlagnahme und Einziehung	Beschlagnahme oder Einziehung der schutzrechtsverletzenden Erzeugnisse bei Einfuhr oder Ausfuhr in ein oder aus einem Land, in dem ein Erzeugnis durch ein gewerbliches Schutzrecht geschützt ist, durch die Zollbehörden
Strafvorschriften	Geld- oder Freiheitsstrafe aufgrund der Schutzrechtsverletzung

Stoffen und Stoffgemischen. Die Patentierungsvoraussetzungen werden von den meisten Patentämtern von Amts wegen geprüft, bevor ein Patent erteilt wird.

Durch die Kriterien Neuheit und erforderliche Tätigkeit ist sichergestellt, dass Patentschutz nur Erfindungen genießen, die über das durchschnittliche Können eines Fachmannes auf dem jeweiligen Gebiet hinausgehen. Nicht wenige Anmeldungen werden mangels erforderlicher Tätigkeit zurückgewiesen.<sup>3</sup> Die gewerbliche Verwertbarkeit als Schutzvoraussetzung grenzt das Gebiet der Erfindungen von Entdeckungen, Theorien

<sup>3</sup>Keukenschrijver in Busse (2003), § 4 RN 1.

**Tab. 3.10** Steckbrief Patente

Schutzgegenstand	Erfindungen auf allen Gebieten der Technik für Erzeugnisse und Verfahren. Die Patentansprüche geben an, für was Schutz begehrt ist. In der Beschreibung und den Zeichnungen ist die Erfindung erläutert
Schutzzvoraussetzungen	<p>Neuheit: Die mit den Patentansprüchen beanspruchte Erfindung war vor dem für den Zeitrang maßgeblichen Tag nicht identisch aus dem Stand der Technik bekannt</p> <p>Erfinderische Tätigkeit: Die beanspruchte Erfindung war für einen auf dem Gebiet der Erfindung tätigen Fachmann an dem für den Zeitrang der Erfindung maßgeblichen Tag aus dem Stand der Technik nicht nahegelegt</p> <p>Gewerbliche Anwendbarkeit: Die beanspruchte Erfindung kann in einem Gewerbebetrieb hergestellt oder verwendet werden</p> <p>Nacharbeitbarkeit: Die Erfindung ist in den Anmeldeunterlagen so vollständig und deutlich beschrieben, dass ein Fachmann sie ausführen kann</p>
Stand der Technik	Zusammengesetzt aus einzelnen, jeweils in sich abgeschlossenen Offenbarungen, wie einzelnen Druckschriften, Vorträgen, Präsentationen, Produkten, Verfahren usw., die vor dem Zeitrang der Erfindung der Öffentlichkeit zugänglich waren. Auch eine vor diesem Zeitrang erfolgte Offenbarung der Erfindung durch den Erfinder oder seinen Rechtsnachfolger kann zum Stand der Technik zählen
Veröffentlichung	Die Patentanmeldung und/oder das erteilte Patent werden veröffentlicht. Die Veröffentlichung dient der Vermehrung des öffentlich verfügbaren Wissens und der Information über den Schutzbereich
Verletzungstatbestand	<p>Unmittelbare Patentverletzung: Alle Merkmale eines Patentanspruches sind in einer Nachahmung verwirklicht</p> <p>Mittelbare Patentverletzung: Ein nicht alltägliches Erzeugnis oder Verfahren führt in einer nachgelagerten Wertschöpfungsstufe zu einer unmittelbaren Patentverletzung</p>

und Werken der Kunst und Literatur ab. Einige Jurisdiktionen fordern, daß die Erfindung technischen Charakter habe.

Die Erfindung muss ferner in den eingereichten Unterlagen so deutlich und vollständig offenbart sein, dass sie ein Fachmann allein anhand dieser Angaben und seines Fachwissens nacharbeiten kann. Hierzu werden bei der Anmeldung zum Patent eine Beschreibung der Erfindung in Textform und meist auch Zeichnungen eingereicht.

Was mit einem Patent unter Schutz gestellt bzw. als Erfindung beansprucht ist, wird durch den Inhalt von Patentansprüchen bestimmt, die neben der Beschreibung und den Zeichnungen ein weiteres Element einer Patentanmeldung bilden. Die Zeichnungen und die Beschreibung helfen, den Sinn und Zweck des Wortlautes der Patentansprüche zu ermitteln (Tab. 3.10).

Die in Tab. 3.9 genannten Ansprüche stehen in den meisten Ländern dem Patentinhaber gegenüber einem unmittelbaren Verletzer zu, der alle Merkmale eines Patentspruches

entweder in dessen Wortsinn oder, über den Wortsinn hinaus, äquivalent, d. h. im Rahmen der beanspruchten Erfindung funktionell gleichwirkend und gleichwertig, verwirklicht. Gegenüber demjenigen, der die Erfindung vor dem Zeitrang des Patents bereits benutzt oder die für eine Benutzung erforderlichen Veranstaltungen getroffen hat, können diese Ansprüche meist jedoch nicht geltend gemacht werden. Der Patentschutz erstreckt sich ferner nicht auf den Stand der Technik und naheliegende Abwandlungen hiervon.

Darüber hinaus gewähren einige Staaten dem Patentinhaber zusätzlich Schutz gegen eine mittelbare Patentverletzung: Der Patentinhaber ist nicht darauf beschränkt, nur die Fälle unmittelbarer Patentverletzung in der Wertschöpfungskette des geschützten Erzeugnisses oder Verfahrens zu verfolgen, sondern kann sich an Lieferanten und Hersteller in vorgelagerten Wertschöpfungsstufen wenden, deren (nicht alltägliche) Erzeugnisse oder Verfahren in einem unmittelbar patentverletzenden Erzeugnis oder Verfahren verwendet werden.<sup>4</sup>

In Deutschland kann Patentschutz durch ein europäisches oder ein deutsches Patent erlangt werden. Das europäische Patent wird gemäß dem Europäischen Patentübereinkommen (EPÜ) vom Europäischen Patentamt<sup>5</sup> (EPA) erteilt und unterliegt nach der Erteilung den nationalen Gesetzen der Mitgliedsstaaten des EPÜ wie die jeweiligen nationalen Patente. Der Patentinhaber kann bestimmen, in welchen Mitgliedsstaaten das europäische Patent Wirkung entfalten soll. Ein Großteil der EU-Mitgliedsstaaten hat Anfang 2013 ein Übereinkommen über ein Einheitliches Patentgericht unterzeichnet, das allerdings noch ratifiziert werden muss. Mit dem Übereinkommen soll es für den Inhaber eines europäischen Patents möglich sein, anstelle einer separaten Validisierung in den einzelnen Mitgliedsstaaten die Fortführung als Einheitliches Patent mit einheitlicher Wirkung für das Gebiet des Patentgerichtsübereinkommens zu beantragen. Mit einer Anwendung des Übereinkommens ist nach derzeitigem Stand nicht vor 2014 zu rechnen.

Deutsche Patente werden vom Deutschen Patent- und Markenamt<sup>6</sup> (DPMA) erteilt. Bei beiden beträgt die Schutzdauer jeweils 20 Jahre ab dem Anmeldetag. Der Schutz setzt mit der Erteilung ein. Die Dauer des Prüfungsverfahrens beträgt beim europäischen Patentamt im Schnitt zwischen 3 und 4 Jahren, beim Deutschen Patent- und Markenamt im Schnitt zwischen zwei und zweieinhalb Jahren.<sup>7</sup>

Einer deutschen oder europäischen Patentanmeldung kann eine internationale Patentanmeldung nach dem Patentzusammenarbeitsvertrag (PCT<sup>8</sup>) vorgeschaltet sein. Eine PCT-Anmeldung bietet ein zentrales Rechercheverfahren und ein sich daran anschließendes optionales, unverbindliches Prüfungsverfahren und gilt als eine nationale bzw. regionale Anmeldung in über 140 Ländern. Das PCT-Verfahren endet nach 30 Monaten nach dem

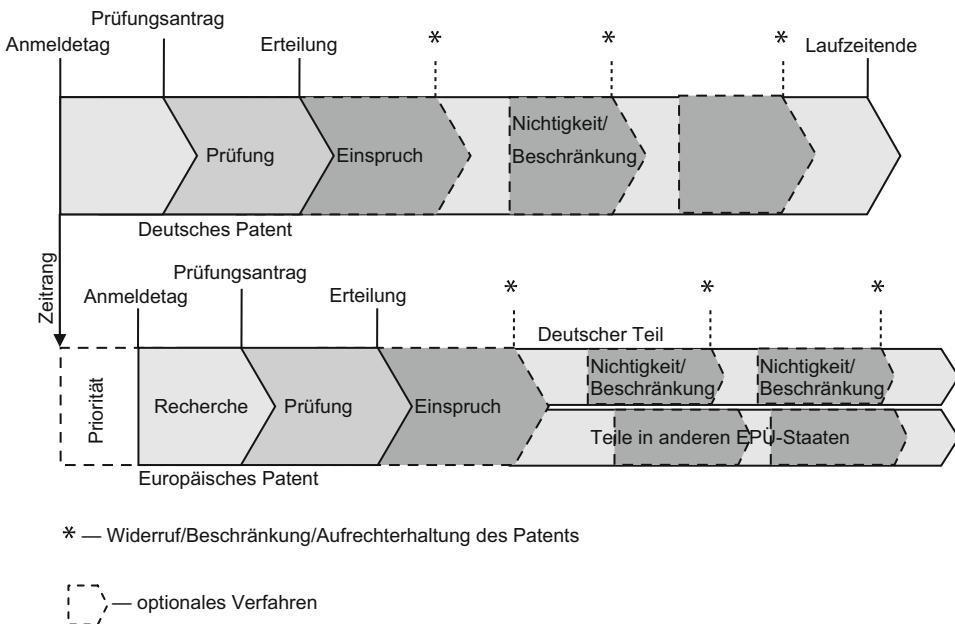
<sup>4</sup> Beispielsweise kann sich der Inhaber eines Patents auf eine Werkzeugmaschine mit einer neu entwickelten Positionsmesseinrichtung unter Geltendmachung einer mittelbaren Patentverletzung auch gegen den unbefugten Hersteller einer solchen Positionsmesseinrichtung wenden, obwohl dieser nicht die beanspruchte Werkzeugmaschine herstellt.

<sup>5</sup> Siehe die Informationen zum Europäischen Patentübereinkommen, europäischen Patenten und dem Europäischen Patentamt unter [www.epo.org](http://www.epo.org).

<sup>6</sup> Siehe die Informationen unter [www.dpma.de](http://www.dpma.de).

<sup>7</sup> Jahresbericht 2009 des Europäischen Patentamtes; FAQ unter [www.dpma.de](http://www.dpma.de).

<sup>8</sup> Siehe die Informationen zum PCT („*patent cooperation treaty*“) unter [www.wipo.int/pct/de/](http://www.wipo.int/pct/de/).



**Abb. 3.125** Lebenszyklen eines europäischen und deutschen Patents am Beispiel einer deutschen Erstanmeldung in Anspruch nehmenden europäischen Patents

Zeitstrahl der PCT-Anmeldung. Bis dahin muss sich der Anmelder in der Regel entschieden haben, in welchen der PCT-Mitgliedsstaaten er die Anmeldung weiterverfolgt.

Abbildung 3.125 zeigt schematisch den Lebenslauf eines europäischen und eines deutschen Patents: Das Europäische Patentamt erstellt nach der Einreichung der Anmeldeunterlagen einen Recherchenbericht und einen schriftlichen Bescheid, in denen zu den Patentierungsvoraussetzungen mit Blick auf den amtlich ermittelten Stand der Technik Stellung bezogen wird. Das eigentliche Prüfungsverfahren beginnt, wenn der Anmelder den Prüfungsantrag stellt und endet mit der Zurückweisung der Anmeldung oder der Erteilung eines Patents. Beim deutschen Patentverfahren wird im Gegensatz zum Verfahren vor dem EP eine Recherche nur auf besonderen Antrag, nicht aber automatisch durchgeführt. Der Prüfungsantrag ist innerhalb von 7 Jahren nach dem Anmeldettag zu stellen. Das deutsche Verfahren bietet seinem Nutzer eine größere Flexibilität, resultiert aber in einem kleineren territorialen Schutz als das europäische Verfahren.

Gegen die Erteilung eines deutschen oder europäischen Patents können Dritte Einspruch einlegen. Oft wird im Einspruchsverfahren der Stand der Technik entgegengehalten, den das Amt in seiner Prüfung nicht oder nur unzureichend berücksichtigt hatte, insbesondere Firmenunterlagen wie Prospekte, Messepräsentationen, Vorträge und Angebote. Aus dem Einspruchsverfahren kann das Patent unverändert oder mit gegenüber der erteilten Fassung eingeschränktem Schutzbereich hervorgehen, oder es wird widerrufen und erlischt. Ist die Einspruchsfrist abgelaufen, müssen die nationalen Teile eines europäischen Patents in jedem Land separat angegriffen und durch die nationalen Gerichte ganz oder teilweise

für nichtig erklärt werden. Die (beschränkte) Aufrechterhaltung oder der Widerruf gelten dann nur für diesen nationalen Teil. Ein derartiger Angriff kann während der Lebensdauer des Patents mehrfach erfolgen, so dass das Patent stets Gefahr läuft, sukzessive beschränkt oder widerrufen zu werden. Daneben kann der Inhaber ein europäisches Patent in seiner Gesamtheit (mit Wirkung für alle Staaten) oder jeweils für ein Land freiwillig beschränken, um Angriffen vorzubeugen.

### **Gebrauchsmuster**

Mit Gebrauchsmustern sollen „kleinere“ Erfindungen unter Schutz gestellt werden; die Anforderungen an die erforderliche Tätigkeit sind gegenüber einem Patent meist herabgesetzt. Nur wenige Staaten sehen Gebrauchsmuster vor, die jeweiligen nationalen Regelungen sind kaum vereinheitlicht. In einigen Ländern gilt für Gebrauchsmuster eine andere Definition des Standes der Technik oder der dem Gebrauchsmusterschutz zugänglichen Erfindungen als bei Patenten. Auch die Laufzeiten können sich von denen eines Patents unterscheiden.

In Deutschland werden Gebrauchsmuster ohne Prüfung auf Neuheit und erforderlichen Schritt vom DPMA eingetragen. Offenbarungen der Erfindung durch den Erfinder oder seinen Rechtsnachfolger innerhalb eines halben Jahres vor dem Zeitrang zählen nicht zum Stand der Technik.<sup>9</sup> Verfahren können nicht unter Schutz gestellt werden. Die Laufzeit beträgt 10 Jahre. Die Anforderungen an die erforderliche Tätigkeit entsprechen denen eines Patents.

### **Halbleiterschutz**

Vom Halbleiterschutz sind die dreidimensionalen Strukturen von mikroelektronischen Halbleitererzeugnissen (Topografien) und selbstständige Teile sowie Darstellungen zur Herstellung von Topografien, beispielsweise Masken, erfasst. Die Halbleitererzeugnisse und Topografien müssen neu sein und Eigenart aufweisen. Aufgrund der geringeren Anforderungen an die Eigenart kann Halbleiterschutz für Topografien erworben werden, die wegen mangelnder erforderlicher Tätigkeit nicht patentfähig wären.

In der Praxis hat sich der Halbleiterschutz nur wenig durchgesetzt. Für den Halbleiterschutz in Deutschland ist das DPMA zuständig.

### **Geschmacksmuster**

Geschmacksmuster, auch „gewerbliche Muster und Modelle“, stellen den dekorativen oder ästhetischen Aspekt von Erzeugnissen unter Schutz, wie die Form oder Oberfläche eines Gegenstands oder zweidimensionale Muster (Tab. 3.11). Bei Erzeugnissen, bei denen nicht nur die dahinter stehende Technologie, sondern auch der ästhetische Eindruck zum Markterfolg beiträgt, stellen Geschmacksmuster eine zunehmend bedeutsame Ergänzung zu einem Patent oder Gebrauchsmuster dar.

Wie der Gegenstand von Patenten und Gebrauchsmustern so muss auch der Gegenstand eines Geschmacksmusters neu und gewerblich verwertbar sein. An die Stelle der

<sup>9</sup>Die Anmeldung eines Gebrauchsmusters ist oft die einzige Möglichkeit, für Erfindungen Schutz zu erlangen, die vom Erfinder oder seinem Rechtsnachfolger vor dem Anmelddatum veröffentlicht worden sind.

**Tab. 3.11** Steckbrief Geschmacksmuster

Schutzgegenstand	Gewerblich verwertbare Muster und Modelle, die den dekorativen oder ästhetischen Aspekt von Erzeugnissen betreffen. Schutz genießen die im Geschmacksmuster sichtbaren Merkmale. Ausschließlich durch ihre technische Funktion bedingte Erscheinungsmerkmale sind vom Schutz ausgeschlossen
Schutzzvoraussetzungen	Neuheit: Das Muster oder Modell war vor dem für den Zeitrang maßgeblichen Tag nicht identisch aus dem Formenschatz bekannt Eigenart: Der Gesamteindruck beim informierten Benutzer unterscheidet sich von dem Gesamteindruck eines anderen Musters, das vor dem für den Zeitrang maßgeblichen Tag im Formenschatz offenbart worden ist, bei diesem Benutzer. Der Grad der Gestaltungsfreiheit des Entwerfers bei der Entwicklung des Musters ist zu berücksichtigen
	Gewerbliche Anwendbarkeit: Die beanspruchte Erfindung kann in einem Gewerbebetrieb hergestellt oder verwendet werden
Formenschatz	Zusammengesetzt aus einzelnen, jeweils in sich abgeschlossenen Offenbarungen, die vor dem Zeitrang der Erfindung der Öffentlichkeit zugänglich waren. Eine frühere Veröffentlichung des Musters kann zum Formenschatz zählen
Verletzungsgegenstände	Muster oder Modelle, die beim informierten Betrachter keinen anderen Gesamteindruck hervorrufen. Der Grad der Gestaltungsfreiheit des Entwerfers ist zu berücksichtigen

erfinderischen Tätigkeit und des Standes der Technik treten jedoch die Eigenart und der Formenschatz.

Besteht für ein Erzeugnis Schutz sowohl durch ein Geschmacksmuster als auch durch ein Patent oder Gebrauchsmuster, so ist zu beachten, dass ein allein durch seine technische Funktion in seiner Gestaltung festgelegtes Merkmal nicht gleichzeitig ein ästhetisches Gestaltungsmerkmal sein kann. Umgekehrt kann ein ästhetisches Gestaltungsmerkmal jedoch eine technische Funktion erfüllen, soweit die zu erfüllende technische Funktion dem Gestalter ausreichend ästhetischen Gestaltungsraum belässt.

In Deutschland wird Geschmacksmusterschutz durch ein Gemeinschaftsgeschmacksmuster, ein deutsches Geschmacksmuster oder ein internationales Geschmacksmuster erlangt. Das Gemeinschaftsgeschmacksmuster basiert auf EU-Recht und wird durch das Harmonisierungsamt für den Binnenmarkt<sup>10</sup> (HABM) mit Wirkung für alle Mitgliedsstaaten der EU (Europäischen Union), das deutsche Geschmacksmuster vom DPMA nur mit Wirkung in Deutschland eingetragen. Das internationale Geschmacksmuster entfaltet über einen internationalen Vertrag<sup>11</sup> Wirkung in Deutschland wie ein nationales Geschmacksmuster. Alle diese Geschmacksmuster werden ohne Prüfung auf Neuheit und Eigenart eingetragen und haben eine Laufzeit von maximal 25 Jahren. Bei allen gilt, dass eine Offenbarung des Musters, die auf den Entwerfer oder seinen Rechtsnachfolger zurückgeht, bei

<sup>10</sup> Siehe die Informationen auf den Internetseiten des Harmonisierungsamtes unter [oami.europa.eu](http://oami.europa.eu).

<sup>11</sup> Das Haager Musterabkommen (HMA). Siehe die Informationen unter [www.wipo.int/hague/en/](http://www.wipo.int/hague/en/).

**Tab. 3.12** Steckbrief Marke

Schutzgegenstand	Alle Zeichen, die geeignet sind, die Waren und Dienstleistungen eines Unternehmens von denen anderer Unternehmen zu unterscheiden
Schutzbegriffe	Absolute Schutzbegriffe: Unterscheidungskraft, keine üblichen, rein beschreibenden, irreführenden sowie hoheitlichen Zeichen Relative Schutzbegriffe: Keine älteren identischen oder verwechslungsfähigen Marken Benutzung: Eine Marke, die nach ihrer Eintragung nicht benutzt wird, kann gelöscht werden
Verletzungstatbestand	Benutzung von identischen Marken und Marken, die mit der eingetragenen Marke verwechslungsfähig sind

der Beurteilung der Neuheit und Eigenart außer Betracht bleibt, wenn sie innerhalb von 12 Monaten vor dem Anmeldetag erfolgt ist.

Ein auf 3 Jahre begrenzter Schutz durch ein Gemeinschaftsgeschmacksmuster entsteht ohne Anmeldung und Eintragung, allein durch Benutzung, ab dem Zeitpunkt des ersten Inverkehrbringens des Musters oder Modells innerhalb der EU.

### Kennzeichenschutz

Unter diesen Begriff fällt der Schutz von Marken, mit denen Waren und Dienstleistungen zur Identifizierung durch die Abnehmer gekennzeichnet werden, und von Unternehmenskennzeichen, die als Name, Firma oder besondere Bezeichnung eines Geschäftsbetriebs oder Unternehmens benutzt werden.

Eine Marke (Tab. 3.12) weist zwei Bestandteile auf, das Kennzeichen selbst und die Waren und Dienstleistungen, die gekennzeichnet werden sollen. Auf die schöpferische Leistung, die der Gestaltung des Kennzeichens zugrunde liegt, kommt es für die Erlangung von Markenschutz nicht an. Maßgeblich ist vielmehr ihre Unterscheidungskraft, d. h. ihre Eignung, von den Abnehmern, an die sich die mit der Marke gekennzeichneten Waren und Dienstleistungen richten, als Herkunftshinweis für diese Waren und Dienstleistungen aufgefasst zu werden.

Markenfähig sind Buchstaben, Buchstabenfolgen, grafische Ausgestaltungen, dreidimensionale Formen, auch die Form einer Ware<sup>12</sup> selbst, sowie in einigen Ländern abstrakte Farben, Tonfolgen und Gerüche. Für Kennzeichen, die die beanspruchten Waren und Dienstleistungen oder deren Eigenschaften unmittelbar beschreiben, kann gewöhnlich kein Schutz erlangt werden.

Eine Marke unterscheidet sich von den übrigen gewerblichen Schutzrechten durch ihre Schutzdauer, die unbegrenzt verlängert werden kann. Im Gegenzug erlischt der Markenschutz in den meisten Ländern, wenn die Marke über einen bestimmten Zeitraum hinweg ununterbrochen nicht benutzt wird.

<sup>12</sup>Die Form einer Ware kann somit sowohl marken- als auch geschmacksmusterfähig sein.

In Deutschland kann Markenschutz durch deutsche Marken, Gemeinschaftsmarken oder Internationale Markenregistrierungen erlangt werden. Deutsche Marken werden vom DPMA nur auf absolute Schutzhindernisse geprüft und bieten Schutz nur in Deutschland. Markenschutz kann in Deutschland auch ohne Eintragung, allein durch Benutzung erlangt werden, wenn die Marke Verkehrsgeltung erworben hat. Gemeinschaftsmarken werden vom HABM ebenfalls nur auf absolute Schutzhindernisse geprüft und mit Wirkung für das EU-Gebiet eingetragen. Internationale Markenregistrierungen beruhen auf internationalen Abkommen<sup>13</sup> und entfalten Wirkung in Deutschland über eine Gemeinschaftsmarke oder eine Deutschen Marke. Relative Schutzhindernisse müssen in einem separaten amtlichen Widerspruchsverfahren oder in einem gerichtlichen Klageverfahren vom Inhaber einer älteren Marke oder Geschäftsbezeichnung geltend gemacht werden.

### **Urheberrecht**

Mit dem Urheberrecht soll Schutz für die Urheber von Werken der Literatur und Kunst geschaffen werden.

Berührungspunkte mit den gewerblichen Schutzrechten ergeben sich dadurch, dass Computerprogramme in Form von Quellcode oder Maschinenprogrammcode und Zusammenstellungen von Daten oder sonstigem Material rechtlich den Werken der Literatur gleichgestellt sind und somit urheberrechtlichen Schutz genießen. Die technischen Ideen und Grundsätze, die irgendeinem Element des Programms einschließlich seiner Schnittstellen zugrunde liegen, sind urheberrechtlich nicht geschützt, können aber patentfähig sein.

Darstellungen wissenschaftlicher oder technischer Art, wie Zeichnungen, Pläne, Karten, Skizzen, Tabellen und plastische Darstellungen, zählen ebenfalls zu den urheberrechtlich geschützten Werken. Bei technischen Zeichnungen ist der dargestellte Konstruktionsgedanke für den Urheberrechtsschutz unerheblich. Der urheberrechtliche Schutz ergibt sich aus der schöpferischen Leistung in der Darstellung an sich, die durch Normen und Vorgaben so weit beschränkt sein kann, dass ein Urheberrechtsschutz nicht begründet wird.

Zusätzlichen urheberrechtlichen Schutz als Werk der angewandten Kunst kann ein Geschmacksmuster erlangen, dem eine besondere künstlerische Leistung zugrunde liegt.

### **Schutz gegen unlauteren Wettbewerb**

Die meisten Länder bieten Schutz gegen unlauteren Wettbewerb, d. h. Wettbewerbshandlungen, die den anständigen Gepflogenheiten im Gewerbe oder Handel zuwiderlaufen. Im Einzelnen unterscheidet sich die Rechtspraxis in den einzelnen Staaten hinsichtlich der Unlauterkeit von Wettbewerbshandlungen erheblich.

Im Hinblick auf die Entwicklung neuer Produkte ist der Schutz gegen den Verrat von Geschäfts- und Betriebsgeheimnissen, darunter fallen geheim zu haltende Entwicklungsunterlagen, von Bedeutung. Der Geheimnisverrat ist in Deutschland mit Geld- oder Freiheitsstrafe und zivilrechtlichen Ansprüchen sanktioniert.

---

<sup>13</sup>Das Madrider Markenabkommen (MMA) und das Protokoll zum Madrider Markenabkommen (PMMA). Siehe die Informationen unter [www.wipo.int/madrid/en/](http://www.wipo.int/madrid/en/).

Der ergänzende wettbewerbliche Leistungsschutz komplementiert den Schutz durch gewerbliche Schutzrechte unter dem Aspekt der unlauteren Wettbewerbshandlung: Er setzt voraus, dass das nachgeahmte Erzeugnis „wettbewerbliche Eigenart“ hat, also bestimmte Merkmale seiner konkreten äußere Ausgestaltung geeignet sind, die angesprochenen Verkehrskreise auf seine betriebliche Herkunft oder seine Besonderheiten hinzuweisen.

### 3.9.3.3 Arbeitnehmererfinderrecht

Aufgrund ihrer besonderen wirtschaftlichen Bedeutung ist der Rechtsübergang vom Erfinder auf den Arbeitgeber in vielen Ländern durch besondere Gesetze geregelt<sup>14</sup>, in der Bundesrepublik Deutschland durch das Arbeitnehmererfindergesetz.

Das Arbeitnehmererfindergesetz findet Anwendung bei Erfindungen und nicht patent- oder gebrauchsmusterfähigen technischen Verbesserungsvorschlägen von Arbeitnehmern, nicht jedoch von freien Mitarbeitern und Organmitgliedern, also von Geschäftsführern, Vorstandsmitgliedern, Gesellschaftern und Komplementären. Es betrifft Diensterfindungen, die während der Dauer des Arbeitsverhältnisses gemacht worden sind und aus der dem Arbeitnehmer im Betrieb obliegenden Tätigkeit entstanden sind oder maßgeblich auf Erfahrungen oder Arbeiten des Betriebs oder der öffentlichen Verwaltung beruhen.

Die Bedeutung dieses Gesetzes zumindest in Deutschland ist hoch, vier Fünftel der zum Patent oder Gebrauchsmuster angemeldeten Erfindungen beruhen auf Diensterfindungen.<sup>15</sup>

Der Arbeitnehmererfinder muss dem Arbeitgeber seine Erfindung gesondert melden und Angaben zur technischen Aufgabe, ihrer Lösung und dem Zustandekommen der Erfindung machen. Die Diensterfindung geht auf den Arbeitgeber automatisch über, wenn der Arbeitgeber die Erfindung nicht innerhalb von 4 Monaten nach ihrer ordnungsgemäßen Meldung durch Erklärung in Textform freigibt.

Mit der Inanspruchnahme hat der Arbeitnehmer gegen den Arbeitgeber einen Anspruch auf angemessene Vergütung und ist der Arbeitgeber verpflichtet und alleine berechtigt, die Diensterfindung im Inland anzumelden. Zu Auslandsanmeldungen ist ebenfalls nur der Arbeitgeber berechtigt; er hat die Erfindung jedoch für Staaten, für die er kein Schutzrecht anstrebt, ggf. unter Vorbehalt eines vergütungspflichtigen Nutzungsrechts, freizugeben.

Gibt der Arbeitgeber die Erfindung frei oder handelt es sich bei der Erfindung nicht um eine Diensterfindung (sog. „freie“ Erfindung), kann der Arbeitnehmer sie auf eigene Rechnung verwerten. Fällt eine freie Erfindung in den vorhandenen oder vorbereiteten Bereich des Arbeitgeberbetriebs, muss sie der Arbeitnehmer dem Arbeitgeber zur Benutzung zu angemessenen Bedingungen anbieten.

Technische Verbesserungsvorschläge lassen auf Seiten des Arbeitnehmers ebenfalls einen Vergütungsanspruch gegen den Arbeitgeber entstehen, wenn letzterer den Vorschlag verwertet und der Vorschlag eine ähnliche Vorzugsstellung gewährt wie ein gewerbl-

<sup>14</sup> Ein Überblick findet sich in Bartenbach und Volz (2012).

<sup>15</sup> Keukenschrijver in Busse (2003), Einl ArbEG RN 1.

ches Schutzrecht. Der Vergütungsanspruch richtet sich nach dem Tarifrecht und den Betriebsvereinbarungen.

Zur Schlichtung von Streitigkeiten zwischen dem Arbeitnehmererfinder und dem Arbeitgeber ist eine spezielle Schiedsstelle beim Deutschen Patent- und Markenamt eingerichtet. Die Anrufung eines ordentlichen Gerichts setzt bis auf wenige Ausnahmen ein vorausgegangenes Verfahren vor dieser Schiedsstelle voraus.

### 3.9.3.4 Entwicklungskooperationen

Forschung und Entwicklung (FuE) wird nicht selten von mehreren Unternehmen gemeinsam betrieben, um die Investitionen in Innovationen zu bündeln und die Ergebnisse der Zusammenarbeit nach Absprache zu verwerten. Derartige Kooperationen bergen das Risiko, dass sie den Wettbewerb zwischen den Unternehmen beeinträchtigen oder gar verhindern, insbesondere wenn durch gewerbliche Schutzrechte und Lizenzen an diesen Schutzrechten der Markt für die neuen Erzeugnisse abgeschottet werden kann. Sie unterliegen daher einer kartellrechtlichen Kontrolle. Die Bedingungen, die derartige Vereinbarungen erfüllen müssen, um kartellrechtlich unbedenklich zu sein, unterscheiden sich von Land zu Land. In Deutschland ist bei FuE-Kooperationen neben dem nationalen Kartellrecht<sup>16</sup> das EU-Kartellrecht zu beachten. Die EU-Kommission hat Verordnungen und Leitlinien herausgegeben, nach denen die kartellrechtliche Unbedenklichkeit von FuE-Kooperationen zu beurteilen ist.<sup>17</sup>

Falls für gemeinsam zu entwickelnde Erzeugnisse oder Verfahren Patente angemeldet werden sollen, ist darauf zu achten, dass die beteiligten Unternehmen und Mitarbeiter zur Geheimhaltung über die Entwicklungsergebnisse wenigstens bis zur Einreichung der Anmeldeunterlagen verpflichtet sind. Andernfalls besteht Gefahr, dass eine vorzeitige Veröffentlichung der Entwicklungsergebnisse Stand der Technik schafft, der der eigenen Patentanmeldung entgegensteht.

### 3.9.3.5 Gewerbliche Schutzrechte und Schutzstrategien

Gewerbliche Schutzrechte stellen weder das einzige, noch das von Unternehmen am häufigsten eingesetzte Instrument dar, um das Risiko der Investitionen in neue Produkte zu verringern. Nach Untersuchungen<sup>18</sup> setzen die Unternehmen als Schutz gegen Nachahmungen auch ein:

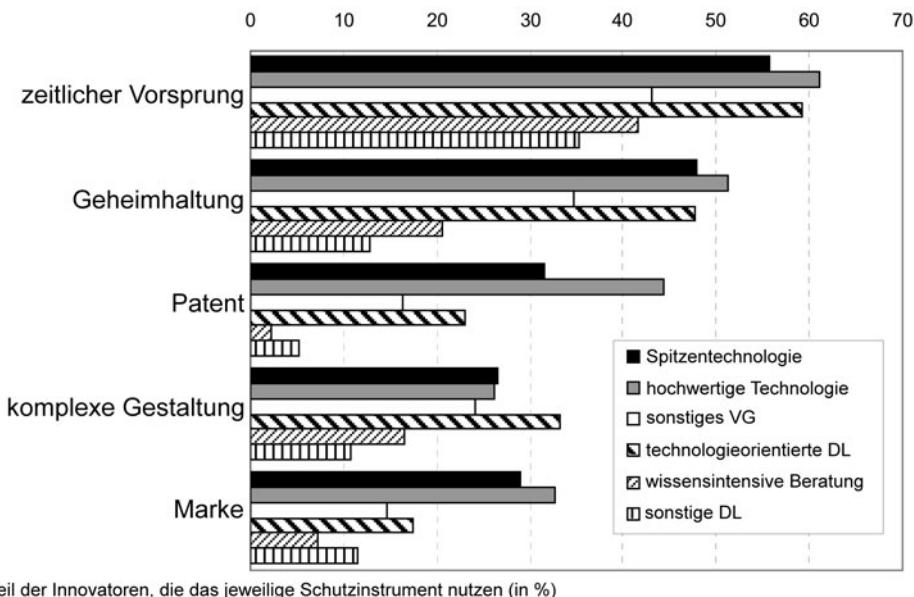
- die Geheimhaltung von firmeninternem Know-how<sup>19</sup>,
- die Ausnutzung eines zeitlichen Vorsprungs beim Markteintritt und schnelle Marktreife,
- die Ergänzung durch komplementäre Erzeugnisse oder Dienstleistungen,

<sup>16</sup>Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB).

<sup>17</sup>So die Verordnungen (EG) Nr. 1217/2010, 1218/2010 und Nr. 772/2004; Leitlinien 2004/C 101/02 und 2011/C11/01.

<sup>18</sup>Cohen et. al. (2000); Oppenländer (1977); Rammer (2002a); Rammer (2007); Gambardella et al. (2006); Arora und Ceccagnoli (2004); Arundel und Kabla (1998); Harabi (1995).

<sup>19</sup>Als Know-how werden die für eine Technologie wesentlichen und geheimen Informationen bezeichnet.



**Abb. 3.126** Bedeutung weiterer Schutzinstrumente zum Schutz von Innovationen (aus Rammer 2002a)

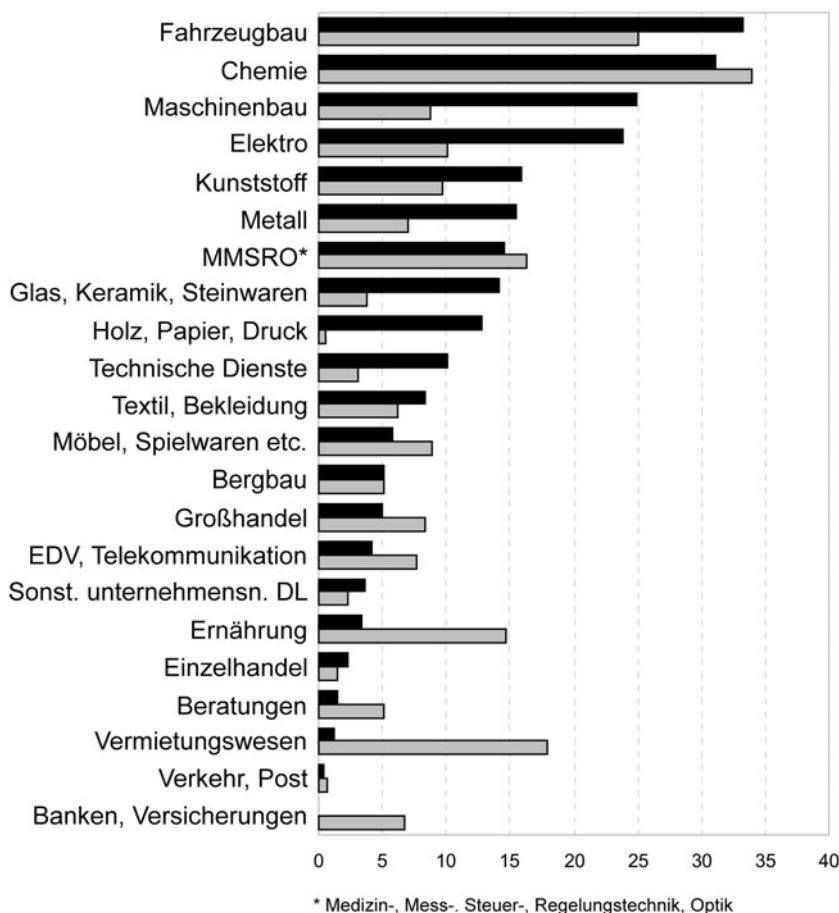
- die Nutzung komplementärer Herstellverfahren,
- die komplexe Produktgestaltung und
- Normungsstrategien.

Wie Abb. 3.126 zeigt, sind die Geheimhaltung von Know-how sowie eine schnelle Marktreife und -einführung von Produkten in vielen Branchen zum Schutz der eigenen Innovationsergebnisse weiter verbreitet als gewerbliche Schutzrechte. Auch die Kundenbindung durch komplementäre Produkte und Dienstleistungen sowie der Schutz durch komplementäre Herstellverfahren werden in einigen Branchen häufiger eingesetzt als gewerbliche Schutzrechte.<sup>20</sup>

Unter den gewerblichen Schutzrechten wird am häufigsten eine Markenstrategie und erst in zweiter Linie ein Schutz durch technische Schutzrechte als flankierende Maßnahme zu den unternehmerischen Schutzstrategien genutzt. Obwohl weit weniger als die Hälfte der Unternehmen Patente und Marken als Schutzinstrumente nutzt (Abb. 3.127), gilt der Patent- und Markenschutz als sehr wirksames Mittel zum Schutze der eigenen Innovationen. Dies dürfte nicht zuletzt an den im Folgenden kurz dargestellten Schwächen und Risiken der anderen unternehmensstrategischen Schutzinstrumente liegen:

**Geheimhaltung** Eine erfolgreiche Geheimhaltung des firmeninternen Know-hows setzt voraus, dass Wettbewerber von dem, was aus einem Unternehmen an die Öffentlichkeit,

<sup>20</sup>Cohen et al. (2002a).



**Abb. 3.127** Anteil der deutschen Innovatoren, die gleichzeitig Patente (schwarze Balken) und Marken (graue Balken) als Schutzinstrumente nutzen (aus Rammer 2002a)

beispielsweise in Form von Produkten, Dienstleistungen, Werbematerialien oder Kunden Gesprächen, gelangt, keine Rückschlüsse auf die geheim zu haltenden Informationen ziehen können.

Der Aufbau und die Funktion von auf dem Markt erhältlichen Erzeugnissen lassen sich nur geheim halten, wenn das Erzeugnis von Wettbewerbern nicht oder nur unter einem unwirtschaftlichen Aufwand zerstörungsfrei analysiert werden kann. Dies ist nur bei wenigen Erzeugnissen sichergestellt. Eine Geheimhaltung kommt somit vornehmlich bei Verfahren und Erzeugnissen in Betracht, zu denen nur ein begrenzter und kontrollierbarer oder gar zur Geheimhaltung verpflichteter Personenkreis Zugang hat. Durch die unvermeidbare Veröffentlichung einer Patentanmeldung würden Wettbewerber Zugang zu dem ansonsten firmeninternen Know-how erhalten und die Erfindung leichter nachbauen können.

Als Risiko einer allein auf Geheimhaltung abstellenden Strategie verbleibt, dass das Know-how mit den damit vertrauten Betriebsangehörigen zu Wettbewerbern abwandern und dort zur Analyse und als Ausgangspunkt von Weiterentwicklungen genutzt werden kann. War die eigene Geheimhaltungsstrategie bislang erfolgreich, dürfte der Einsatz des abgewanderten Know-hows einem Wettbewerber nicht ohne Weiteres nachzuweisen sein.

**Zeitlicher Vorsprung** Der zeitliche Vorsprung kann meist nur über begrenzte Zeit wirtschaftlich genutzt werden, bevor Folgeunternehmen den Markt betreten.

Beruht der zeitliche Vorsprung auf einem technologischen Vorsprung, kann durch Patente ergänzend versucht werden, Wettbewerber von der Nutzung der Pioniertechnologie abzuhalten. Je nach Breite des Patentschutzes werden von dem Ausschließlichkeitsrecht nicht nur das Pionierprodukt imitierende, sondern auch das Pionierprodukt modifizierende Folgeprodukte erfasst. Der zeitliche Vorsprung kann durch den Patentschutz also verlängert werden.

**Komplementäre Produkte und Dienstleistungen** Die Nutzung komplementärer Produkte und Dienstleistungen, wie beispielsweise einer Kundenbindung durch Baukastensysteme, eine proprietäre Gestaltung von Ersatz- oder Verschleißteilen oder spezielle Dienst- und Serviceleistungen am Produkt, geht in der Praxis nicht selten mit einer Markenstrategie einher.<sup>21</sup> Die sich ergänzenden Produkte und Dienstleistungen werden unter einer einheitlichen Marke angeboten. Ein wirksamer Patentschutz für die Schnittstellen, an denen die komplementären Produkte oder Dienstleistungen verzahnt sind, kann verhindern, dass Wettbewerber konforme Produkte und Dienstleistungen anbieten.

**Komplementäre Herstellprozesse** Die Verteilung von jeweils in sich abgeschlossenen, komplementären Herstellprozessen in einem Unternehmensverbund, im Joint Venture oder in strategischen Unternehmensallianzen setzt in nicht wenigen Fällen eine Preisgabe zumindest eines Teils des firmeninternen Wissens voraus, was dem Netzwerk der Hersteller jedoch insgesamt zugute kommt.<sup>22</sup>

Die Bildung exklusiver vertikaler oder horizontaler Unternehmenszusammenschlüsse kann allerdings kartellrechtlich bedenklich sein. Für viele Produkte ist diese Strategie wegen einer geringen Fertigungstiefe nicht anwendbar.

**Komplexe Produktgestaltung** Eine komplexe und technisch aufwändige Gestaltung von Produkten und Dienstleistungen erschwert deren Nachahmung, vor allem wenn firmeninternes Know-how eingesetzt wird. Dieses Schutzinstrument tritt bei der Gestaltung von Produkten gegenüber Patenten als Innovationsschutz zurück, spielt aber bei Dienstleistungen eine größere Rolle.<sup>23</sup>

<sup>21</sup>Rammer (2002).

<sup>22</sup>Am Beispiel der Fertigungsnetzwerke von Toyota und General Motors: Blaxill und Eckardt (2009).

<sup>23</sup>Rammer (2002a), Rammer (2007).

**Tab. 3.13** Die Verwendungen eines Patents

Nachahmungsschutz	Wettbewerber werden von einer Übernahme der eigenen Technologie abgehalten
Qualitätsangabe	Mit Patenten werden die eigene Innovationstätigkeit und der innovative Charakter der eigenen Produkte herausgestellt
Unternehmenswert	Patente haben Auswirkungen auf den Firmenwert; sie können als Sicherheiten dienen und in Bilanzen aufgenommen werden
Handelsmasse	Patente können in Verhandlungen eingebracht werden, um Zugang zu fremder Technologie zu erhalten oder Streitigkeiten abzuwenden
Information	Patentveröffentlichungen lassen sich von Wettbewerbern zur Informationsgewinnung über das anmeldende Unternehmen nutzen
Stand der Technik	Durch die Veröffentlichung wird Stand der Technik gegen spätere Patente an Wettbewerber geschaffen

**Normungsstrategien** Normen definieren von jedem Anwender nutzbare Gemeinschaftsmerkmale, mit denen Waren und Dienstleistungen zu bestimmten Zwecken vereinheitlicht werden. Normierte Waren und Dienstleistungen sind gegeneinander austauschbar.

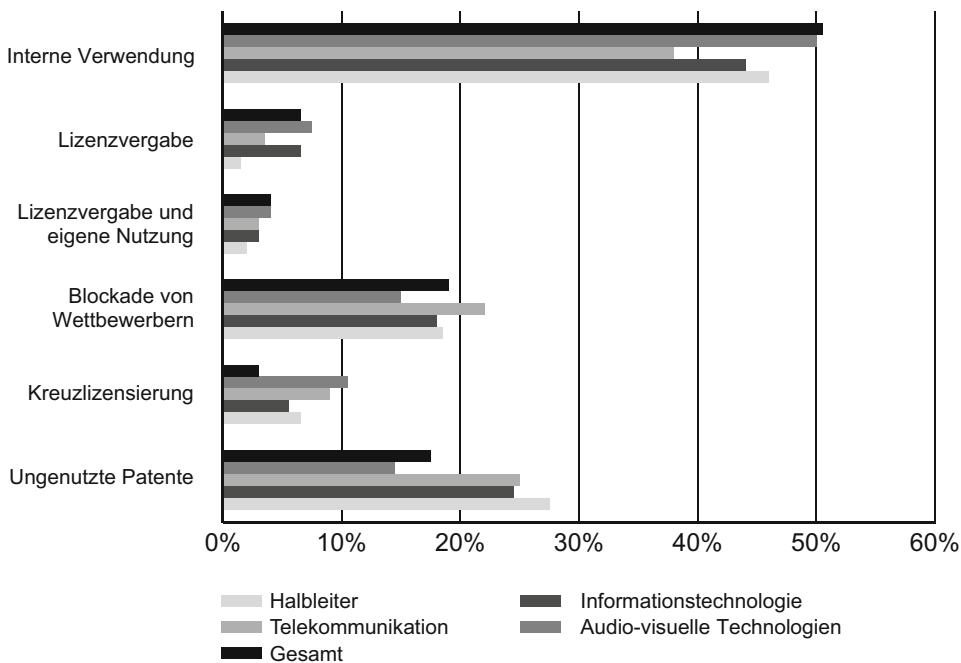
Damit stehen Normen in einem Spannungsverhältnis mit den Gewerblichen Schutzrechten, insbesondere den Patenten, die Alleinstellungsmerkmale unter Schutz stellen und dadurch einen Wettbewerbsvorteil sichern sollen.

Das Spannungsverhältnis zwischen Normen und Patenten gewinnbringend aufzulösen, ist zunehmend Gegenstand unternehmerischer Strategien: Gewerbliche Schutzrechte können in Normen eingebracht, müssen dann aber den Nutzern der Norm entgeltfrei oder zu fairen, angemessenen und nicht-diskriminierenden (FRAND<sup>24</sup>) Lizenzbedingungen zur Verfügung gestellt werden. Auf diese Weise kann unter Mitwirkung des Schutzrechtsinhabers eine normierte Basistechnologie für einen Markt geschaffen werden, der sich in dieser Breite proprietären Produkten gegenüber nicht geöffnet hätte. Die Basistechnologie kann dann von dem Unternehmen als Plattform für darauf aufbauende, proprietär bleibende Waren und Dienstleistungen dienen, die gegenüber der normierten Basistechnologie einen Zusatznutzen versprechen.

### 3.9.3.6 Aufbau eines eigenen Patentportfolios

Sollen für ein neu entwickeltes Produkt Patente oder Gebrauchsmuster angemeldet werden, so ist im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse, ggf. nach Durchführung entsprechender Patentrecherchen, zu klären, welche der in dem neuen Produkt realisierten Innovationen unter Schutz gestellt werden sollen. Bei der Kosten-Nutzen-Analyse sind die in Tab. 3.13 angegebenen möglichen Verwendungen des Patentschutzes zu berücksichtigen, die nach Umfragen für Unternehmen eine bedeutende Rolle spielen (Abb. 3.128).

<sup>24</sup>FRAND: Fair, Reasonable and Non-Discriminatory (fair, angemessen und diskriminierungsfrei).



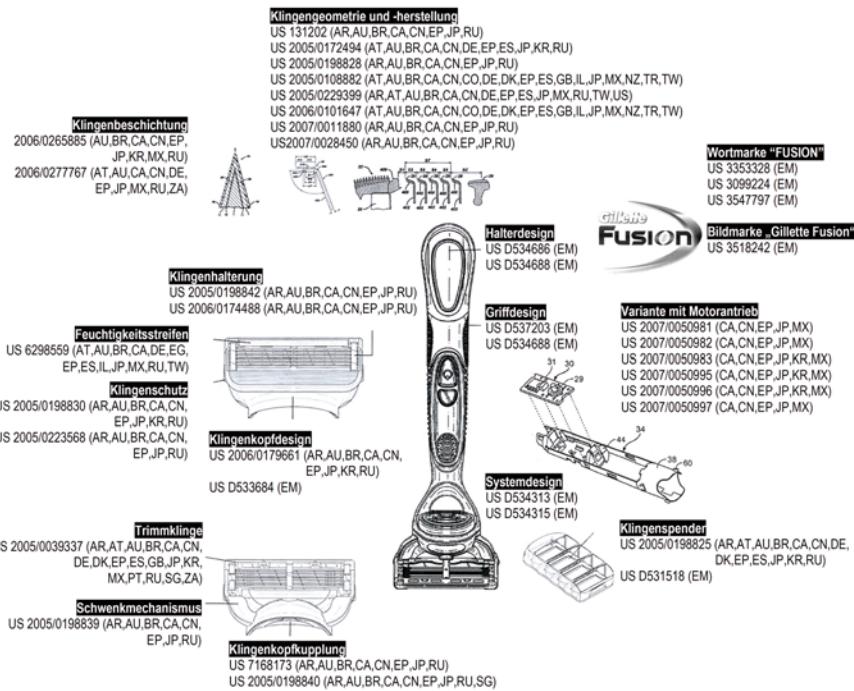
**Abb. 3.128** Verwendung von Patenten in europäischen Unternehmen (aus Lévéque und Ménière 2002)

Ebenfalls zu klären ist, in welchen Ländern Patentschutz erworben werden soll. Diese Entscheidung kann unter Zwischenschaltung einer PCT-Anmeldung um bis zu 30 Monate nach dem Anmeldetag der Erstanmeldung verschoben werden, so dass die wirtschaftliche und technologische Entwicklung des Produkts abgewartet werden kann, bevor die zum Teil erheblichen Kosten für einen umfassenden Auslandsschutz anfallen.

Häufig entfalten nicht die Patente auf Neuentwicklungen mit der „größten Erfindungshöhe“, sondern auf im Produkt unscheinbare, aber mit vertretbarem Aufwand nur schwer zu umgehende Verbesserungen die größte Wirkung gegenüber Wettbewerbern (sog. „commercially essential patents“). Solche Patente führen oft zu einem erheblichen Kostenaufwand auf Seiten der Wettbewerber, die nicht patentverletzende Umgehungslösungen entwickeln oder, um den Bestand des Patents herauszufordern, eigene umfangreiche Recherchen gegen das Patent im Stand der Technik durchführen müssen.

In der Praxis ist ein Produkt nicht selten gleichzeitig durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Schutzrechten geschützt,<sup>25</sup> wie Abb. 3.129 am Beispiel eines Handrasierers zeigt: Patente, Geschmacksmuster und Marken decken eine Vielzahl von im Produkt realisierten technischen Innovationen sowie dessen ästhetische Formgebung und Kennzeichnung ab. Durch die Vielzahl der Schutzrechte ist das Risiko abgepuffert, dass sich eines oder mehrere

<sup>25</sup>Nach Arora et al. (2005) ist eine Innovation im Schnitt durch 5,6 US-Patente abgesichert.



**Abb. 3.129** Gewerbliche Schutzrechte am Beispiel eines Nassrasierers (nach Blaxill und Eckardt 2009)<sup>26</sup>

der Schutzrechte während der Lebensdauer des Produkts als nicht rechtsbeständig erweisen und das Produkt gemeinfrei wird.

Einige der Schutzrechte betreffen produktübergreifend verwertbare Entwicklungen, wie beispielsweise die Beschichtung, Befestigung, Anordnung und Geometrie der Rasierklingen. Andere sind produktspezifischer und betreffen beispielsweise die Anzahl der Klingen. Wiederum andere befassen sich mit der proprietären Ausgestaltung der Schnittstelle zwischen den Klingenköpfen und dem Handgriff, um Wettbewerbern den Zugang zum Ersatzteilmarkt zu erschweren oder zu versperren.

Ob und inwieweit ein Unternehmen auf seinem Gebiet der Technik von einer proprietären Gestaltung von Schnittstellen profitiert, entscheidet sich im Einzelfall. Bei einer Lizenzierung oder Freigabe der Schnittstellen kann sich das Produkt evtl. schneller auf dem Markt durchsetzen und eine breitere Basis für die eigenen Produkte schaffen. Dieser Weg

<sup>26</sup>Zu den US-Patentveröffentlichungen sind die Länder mit ihrem Länderkürzel angegeben, in denen Mitglieder der Patentfamilie veröffentlicht wurden. Bei den Geschmacksmustern (der Veröffentlichungsnummer vorangestelltes „D“) und Marken ist lediglich angegeben, ob auch um eine Gemeinschaftsmarke oder ein Gemeinschaftsgeschmacksmuster nachgesucht wurde. Angaben zu den Länderkürzeln finden sich im WIPO Standard ST. 3 unter [www.wipo.int/export/sites/www/standards/pdf/03-03-01.pdf](http://www.wipo.int/export/sites/www/standards/pdf/03-03-01.pdf).

kann aber auch in einem Imitationswettbewerb münden, in dem sich die Innovationskosten nicht mehr decken lassen. Eigene Schutzrechte versetzen das Unternehmen zumindest in die Lage, die Strategie selbst zu bestimmen.

Die Geschmacksmuster und Marken schließlich betreffen das konkrete Produkt in seiner ästhetischen Gestaltung und Kennzeichnung. Bei Fortentwicklungen des Produkts kann im Rahmen einer Markenstrategie an den Markennamen oder an einzelne Gestaltungsmerkmale der vorherigen Version angeknüpft werden.

Sinnvollerweise werden in denjenigen Ländern Schutzrechte angestrebt, in denen die Hauptwettbewerber mit ihren Produktions- oder Vertriebsstätten ihren Sitz haben bzw. die größten Märkte oder Marktchancen vorhanden sind.<sup>27</sup> In einzelnen Branchen werden Schutzrechte in Ländern angemeldet, in denen sich große Umschlagsplätze befinden, um dort Piraterieprodukte durch die Zollbehörden vor ihrer Verteilung auf verschiedene Gebiete beschlagnahmen zu lassen. Gerade Geschmacksmuster erfreuen sich in diesem Zusammenhang einer zunehmenden Bedeutung, weil sie im Gegensatz zu Patenten einen geringeren technischen Sachverstand auf Seiten der Gerichte voraussetzen. In Ländern, in denen Patentstreitigkeiten selten sind, kann dies von Vorteil sein.

Der Aufbau und die Betreuung eines umfangreichen Schutzrechtsportfolios, wie es Abb. 3.129. zeigt, führen zu einem Kosten- und Zeitaufwand, der nicht von jedem, insbesondere nicht von einem kleinen oder mittleren Unternehmen aufgebracht werden kann. Meist wird man sich auf die wirtschaftlich oder technisch bedeutendste oder die hinsichtlich der Bestandskraft des Schutzrechts sicherste Innovation beschränken müssen.

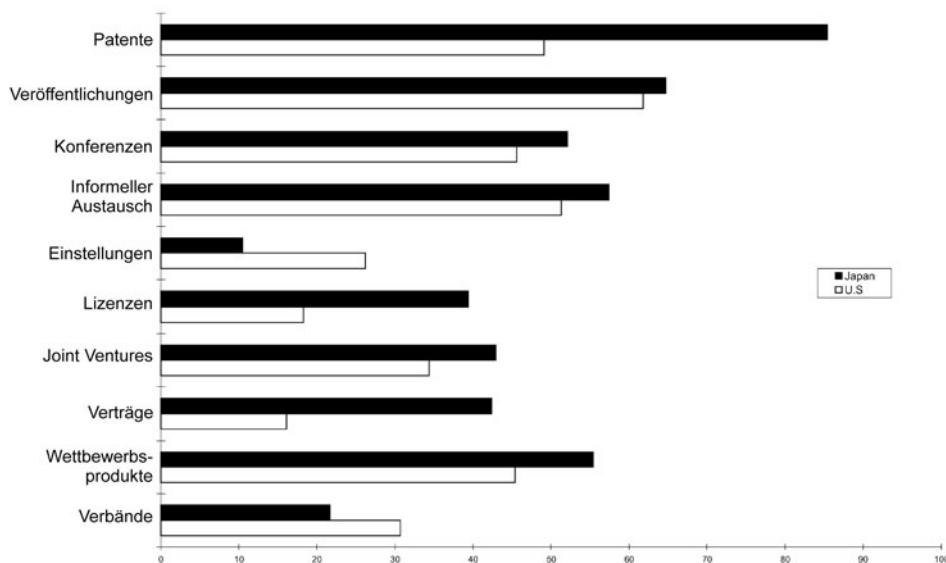
### 3.9.3.7 Die Rolle von Patenten im Produktentwicklungsprozess

Die Patent- und Gebrauchsmusterveröffentlichungen stellen eine einheitlich strukturierte, öffentlich zugängliche Informationsquelle für technisches Wissen dar, die von Unternehmen stark genutzt wird (Abb. 3.130). Patentämter und Dienstleistungsunternehmen bieten Zugang zu diesem Wissen in Form recherchierbarer Datenbanken<sup>28</sup> und stellen Informationen über den Verfahrensstand anhängiger Patentanmeldungen oder erteilter Patente zur Verfügung.<sup>29</sup> Durch Patentrecherchen lassen sich

<sup>27</sup> Hinweise zu Länderstrategien finden sich z. B. unter [www.wipo.int/pct/en/pct\\_strategies/index.html](http://www.wipo.int/pct/en/pct_strategies/index.html) und [www.wipo.int/pct/en/pct\\_strategies/archive.html](http://www.wipo.int/pct/en/pct_strategies/archive.html).

<sup>28</sup> Die folgenden Patentdatenbanken sind über das Internet kostenfrei zugänglich: Die Datenbank DEPATISNET des DPMA, [depatisnet.dpma.de](http://depatisnet.dpma.de), die Datenbank ESPACENET des EPA, [www.espacenet.com](http://www.espacenet.com), PATFT und APPFT des US-Patent- und Markenamtes, [patft.uspto.gov](http://patft.uspto.gov), und die japanische Industrial Property Digital Library, [www.ipdl.inpit.go.jp/homepg\\_e.ipdl](http://www.ipdl.inpit.go.jp/homepg_e.ipdl), mit Maschinübersetzungen ins Englische der jüngeren japanischen Patent- und Gebrauchsmusterveröffentlichungen.

<sup>29</sup> So das Online-Patentregister des DPMA, [register.dpma.de](http://register.dpma.de), die Datenbank EPOLINE des EPA unter [register.epo.org](http://register.epo.org) (<https://register.epo.org>) und die Datenbank PAIR des US-Patent- und Markenamtes unter [portal.uspto.gov/external/portal/pair](http://portal.uspto.gov/external/portal/pair).



**Abb. 3.130** Wichtigkeit der Informationsquellen über FuE-Aktivitäten von Wettbewerbern in % der Befragten, die diese Quelle als „mäßig wichtig“ oder „sehr wichtig“ eingestuft haben (aus Cohen et al. 2002).

- verfügbare Technologien zur Lösung eines bestimmten technischen Problems,
- die Anmelder und Inhaber dieser Technologien und
- proprietäre Technologien, die nicht ohne Weiteres genutzt werden können,

ermitteln. Bezüglich möglicher Recherchestrategien und der Auswertung der Ergebnisse wird zur Vertiefung auf die Spezialliteratur verwiesen.<sup>30</sup>

In den Patentdatenbanken sind die in einer Patentveröffentlichung enthaltenen Daten in unabhängig voneinander recherchierbare Felder gegliedert. Diese Felder entsprechen weitgehend den in einer gedruckten Patentveröffentlichung wiedergegebenen Feldern.<sup>31</sup> Auch Volltextsuchen nach Worten und Wortbestandteilen in den Anmeldetexten sind möglich. Die Suchergebnisse lassen sich zeitlich und territorial eingrenzen.

Eine Patentrecherche nach technischen Stichwörtern und deren Synonymen führt oft zu sehr umfangreichen Ergebnissen. Um diese Ergebnisse auf ein technisches Gebiet zu begrenzen, kann die international von den Patentämtern eingesetzte IPC-Klassifizierung<sup>32</sup>

<sup>30</sup> Bendl und Weber (2008), Bayerischer Industrie- und Handelskammertag (2007), Däbritz (2008), Engelhardt (1988), Philippus (1997), Potempa et al. (2001), Tiefel (2007), Wurzer (2003).

<sup>31</sup> Die Felder sind international einheitlich mit INID-Codes („Internationally agreed numbers for the identification of data“) nummeriert, DPMAinformativ (Deutsches Patent- und Markenamt 2008).

<sup>32</sup> Die internationale Patentklassifizierung („International Patent Classification“, IPC) basiert auf einem internationalen Abkommen und stellt ein hierarchisches System sprachunabhängiger Symbole

**Tab. 3.14** Die IPC-Klassifizierung am Beispiel eines Handrasierers

Hierarchie	IPC-Symbol	IPC-Titel
Sektion	B	Arbeitsverfahren, Transportieren
Klasse	B26	Handschneidwerkzeuge; Schneiden; Trennen
Unterklasse	B26B	Handschneidwerkzeuge
Hauptgruppe	B26B 21/00	Rasiergeräte mit freiliegender Schneide oder Rasiermesse; Sicherheits-Rasierapparate oder andere Rasiergeräte nach Art eines Hobels; Haarschneidevorrichtungen mit einer Rasierklinge; Ausrüstung hierfür
Untergruppe	B26B 21/08	... mit auswechselbaren Klingen
Untergruppe	B26B 21/14	... Sicherheits-Rasierapparate mit einer oder mehreren quer zum Griff angeordneten Klingen
Untergruppe	B26B 21/22	... mit mehreren gleichzeitig benutzten Klingen

genutzt werden: Beim Eingang einer Patentanmeldung wird diese durch das jeweilige Patentamt nach dem technischen Gebiet der beanspruchten Erfindung klassifiziert, wobei einer Anmeldung auch mehrere IPC-Klassen zugewiesen werden können.

Einige Datenbanken erlauben eine Recherche in der IPC-Klassifikation,<sup>33</sup> um die für eine Recherche geeigneten IPC-Klassen oder -Gruppen (s. Tab. 3.14) zu ermitteln. Neben der Unschärfe bei der Zuweisung der IPC-Klassen durch die Patentämter ist hierbei jedoch problematisch, dass sich der Schutzbereich der Ansprüche eines Patents über die jeweilige IPC-Klasse hinaus erstrecken kann. So mag sich zwar eine Patentveröffentlichung in erster Linie mit der Beschichtung von Rasierklingen befassen, mit den Ansprüchen jedoch die Beschichtung von jedweder Art von Schneiden unter Schutz gestellt sein.

Durch Technologierecherchen lassen sich die Patentportfolien der Wettbewerber und die Schutzrechtssituation auf einem technologischen Gebiet ermitteln. Dies erlaubt zum einen die Identifikation von Technologie- oder Anwendungslücken, in denen eine eigene Entwicklung und Vermarktung von Produkten ungestört erfolgen kann. Zum anderen kann über die Patentportfolien der Wettbewerber und deren zeitlichen Entwicklungen auf die Produktentwicklungsstrategien und die zukünftigen Märkte der Wettbewerber geschlossen werden. Hierzu werden Statistikanalysen und das sog. „Patent-Mapping“ eingesetzt.

Die Schutzrechtssituation auf einem technologischen Gebiet und deren zeitliche Entwicklung unabhängig von den jeweiligen Anmeldern lassen Technologietrends erkennen. Ferner lassen sich bestehende Patente und Gebrauchsmuster identifizieren, die einer freien Nutzung der für ein zu entwickelndes Produkt notwendigen Technologien entgegenste-

---

zur Klassifizierung der Technologiefelder dar, mit denen sich ein Patent oder Gebrauchsmuster befasst. Informationen über die internationale Patentklassifizierung sind abrufbar unter [www.wipo.int/classifications/ipc/en/](http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/).

<sup>33</sup>Das DPMA stellt unter [depatisnet.dpma.de/ipc/](http://depatisnet.dpma.de/ipc/) eine über das Internet zugängliche Recherchemöglichkeit bereit.

hen. Über die territoriale Verteilung der Schutzrechte kann festgestellt werden, in welchen Ländern der Marktzugang erschwert ist.

Sind bestimmte Patentveröffentlichungen als relevant identifiziert, so können diese überwacht werden, um über Änderungen automatisch informiert zu werden.<sup>34</sup>

Die Suche nach bereits bekannten Lösungen in Patentdatenbanken vermeidet einen unnötigen Mehrfachaufwand und die Duplizierung von Entwicklungsergebnissen. Hat man eine für die eigene Produktentwicklung brauchbare Lösung identifiziert, die unter Patentschutz steht, ist zu überlegen, ob

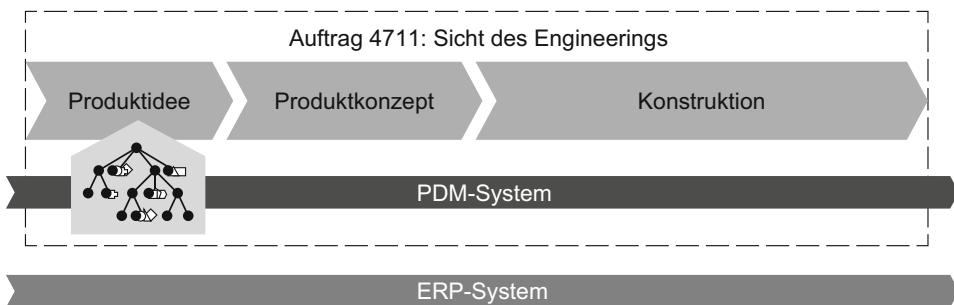
- eine eigene Umgehungslösung entwickelt wird,
- auf eine ältere, aufgrund Erlöschen des betreffenden Patents sicher patentfreie Lösung identisch zurückgegriffen wird,
- mit dem Patentinhaber Kontakt aufgenommen wird, um Nutzungsrechte an der patentierten Lösung zu erwerben, oder
- das Patent mit entgegenstehendem, u. U. neu recherchiertem Stand der Technik angegriffen und zu Fall gebracht oder im Schutzbereich so stark eingeschränkt wird, dass die für die eigene Produktentwicklung interessante Lösung nicht mehr erfasst ist.

Die Verhandlungen mit dem Patentinhaber eines der eigenen Entwicklung entgegenstehenden Patents gestalten sich einfacher, wenn die Einschränkung oder Vernichtung seines Patents aufgrund ihm bisher unbekannten Standes der Technik droht oder im Wege einer Kreuzlizenenzierung dem Inhaber des im Wege stehenden Patents Zugang zu ihm fremder, proprietärer Technologie angeboten werden kann. Die Kreuzlizenenzierung ist in technischen Gebieten weit verbreitet, in denen die Beweglichkeit der Unternehmen durch eine Vielzahl von Patenten, dem sog. Patentdickicht, stark eingeengt ist. Mehrere Unternehmen können auch ihre kreuzlizenzierten Patentportfolios für ein Produkt in einem Patentpool bündeln. Nutzer können Lizenzen nur am gesamten Pool erwerben. Patentpools können sich erheblich auf den Wettbewerb auf einem technischen Gebiet auswirken, so dass sie bestimmte Bedingungen erfüllen müssen, um keinen kartellrechtlichen Bedenken zu begegnen.<sup>35</sup>

Die Verwendung von Patentinformationen im Produktentwicklungsprozess ist jedoch nicht unkritisch: Oftmals lösen sich die Entwickler nur schwer von einer attraktiven, aber patentgeschützten Lösung eines Wettbewerbers und unterschätzen den Schutzmfang der Patentansprüche. Es wird verkannt, dass in der Beschreibung des Patents nur ein mögliches Ausführungsbeispiel des erforderlichen Grundkonzepts in seiner konkreten Ausgestaltung beschrieben, in den Patentansprüchen jedoch ein allgemeines Lösungsprinzip unter Schutz

<sup>34</sup> Das Europäische Patentamt bietet einen derartigen Überwachungsdienst für europäische Patente unter WebRegMT an. Private Dienstleister bieten Überwachungen für nahezu jedes Land und Schutzrecht an.

<sup>35</sup> EU-Kommission: Leitlinien zur Anwendung von Artikel 81 EG-Vertrag auf Technologietransfer-Vereinbarungen (2004/C 101/02).



**Abb. 3.131** Sicht des Engineerings zu Projektbeginn

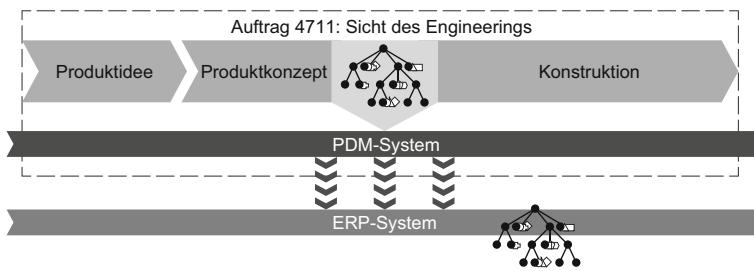
gestellt ist, das gleichwirkende Alternativen zu den im Ausführungsbeispiel verwirklichten Lösungsvorschlägen umfassen kann.

### 3.10 Fertigungsplanung und Beschaffung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

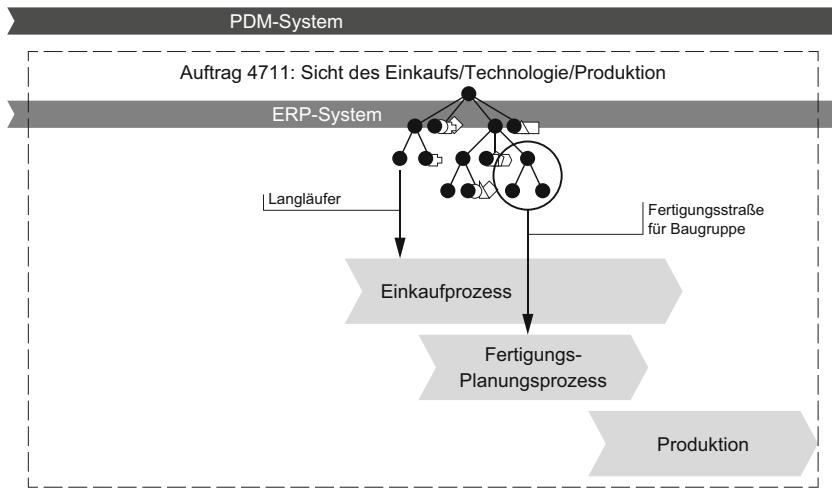
Im ersten Kapitel dieses Buchteils wurde bereits auf die stattgefundenen Veränderungen bei der Produktentstehung hingewiesen. Unter dem Stichwort „Globalisierung“ wird heute der Zwang zu immer kostengünstigeren Produkten und einer sich ständig verkürzten „Time to Market“-Strategie zusammengefasst. Hiervon ist auch die Entwicklung und Konstruktion eines Produkts betroffen. Die wesentlichen Ansätze zur Kostenreduzierung und damit zur Rationalisierung werden in Teil 4 dieses Buches behandelt. Gleichermaßen gilt für „Time to Market“. An dieser Stelle soll kurz auf die Verflechtung von Entwicklung und Konstruktion mit dem Einkauf und der Fertigung des Unternehmens eingegangen werden. Das Engineering eines Unternehmens ist frühzeitig gezwungen, sich Gedanken über den Einkauf und die Fertigung von Komponenten gemeinsam mit den jeweiligen Hauptverantwortlichen zu machen. In den folgenden Abbildungen sollen die Zusammenhänge kurz und vereinfacht dargestellt werden.

Abbildung 3.131 stellt die Sicht des Engineerings zu Projektbeginn dar. Das Hauptarbeitsmittel ist heute das PDM-System (Produktdatenmanagement-System). Über dieses werden die Daten und notwendigen Applikationen wie CAD-Systeme, FEM-Berechnung usw. gesteuert. Zu Beginn der Auftragsabwicklung wird heute typischerweise ein Produkt der Vergangenheit ermittelt, von welchem, möglichst ohne große Änderungen, das neue abgeleitet werden kann.

In Abb. 3.131 ist auf der linken Seite symbolhaft die Produktstruktur (Strukturstückliste) eines Produkts abgebildet. Es wird nach der Wahl der passenden Strukturstückliste dann ermittelt, welche Baugruppen und Komponenten unverändert übernommen und welche



**Abb. 3.132** Sicht des Engineering in der Konstruktionsphase



**Abb. 3.133** Sicht des Einkaufs und der Fertigung nach Konstruktionsabschluss

ganz oder teilweise neu konstruiert werden müssen. Das Produktkonzept liegt also vor und die zu konstruierenden Komponenten werden bearbeitet, s. Abb. 3.132.

Die Produktstruktur und damit die Strukturstückliste als ihr Repräsentant, werden so früh wie möglich im ERP-System (Enterprise-Resource-Planning-System) gespeichert. Über das ERP-System können alle Beteiligten den Stand des Projekts verfolgen. Nur fertig konstruierte oder bei Katalogkomponenten ausgewählte Bauteile und Baugruppen werden in das ERP-System übergeben. Der Grund liegt darin, dass auf Basis der Informationen im ERP-System der Einkauf Bestellungen auslösen und die Fertigung mit der Planung der Produktion beginnen kann. Im Laufe des weiteren Konstruktionsprozesses wird also die Strukturstückliste nach und nach durch das Engineering aufgefüllt und ergänzt. Der Einkauf und die Fertigungsplanung, evtl. auch bereits die Fertigung von Komponenten, werden kontinuierlich fortgesetzt. Wenn der Konstruktionsprozess abgeschlossen ist, befindet sich die vollständige Strukturstückliste des Produkts im ERP-System und das Engineering des Unternehmens hat keinen direkten Zugriff mehr auf dieses Dokument, s. Abb. 3.133.

Nur über einen Änderungsantrag (Change Order Request) kann dann noch eine Veränderung an den Unterlagen durch das Engineering vorgenommen werden. Der Grund liegt im Planungsprozess des Einkaufs und der Fertigung. Zum Zeitpunkt einer evtl. Änderung der Konstruktion nach Abschluss des Konstruktionsprozesses muss geprüft werden, in welchem Zustand sich die betreffenden Komponenten befinden. Bestelländerungen bei Lieferanten führen zwangsläufig zu Mehrkosten. Gleiches gilt für Änderungen im Fertigungsprozess oder für das Verschrotten abgearbeiteter Bauteile.

---

## Literatur

### Abschnitt 3.1

- DIN 69 900 Teil 1 (1987) Netzplantechnik, Begriffe. Beuth, Berlin  
DIN 69 900 Teil 2 (1987) Netzplantechnik, Darstellungstechnik. Beuth, Berlin  
DIN 69 903 (1987) Kosten und Leistung, Finanzmittel. Beuth, Berlin

### Abschnitt 3.2

- Albers A (1994) Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. VDI-Berichte 1120. VDI-Verlag, Düsseldorf  
Badke-Schaub P (1993) Gruppen und komplexe Probleme. Peter Lang, Frankfurt am Main  
Beitz W (1995) Simultaneous Engineering – Eine Antwort auf die Herausforderungen Qualität, Kosten und Zeit. In: Strategien zur Produktivitätssteigerung – Konzepte und praktische Erfahrungen. ZfB-Ergänzungsheft 2(1995):3–11  
Beitz W (1996) Customer Integration im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess. Konstruktion 48:31–34  
Bender B, Tegel O, Beitz W (1996) Teamarbeit in der Produktentwicklung. Konstruktion 48:73–76  
Dörner D (1994) Gruppenverhalten im Konstruktionsprozess. VDI Berichte Nr. 1120, S 27–37. VDI-Verlag, Düsseldorf  
Ehrlenspiel K (1995) Integrierte Produktentwicklung – Methoden für Prozessorganisation, Produktgestaltung und Konstruktion. Hanser Verlag, München  
Feldhusen J (1994) Konstruktionsmanagement heute. Konstruktion 46: 387–394  
Helbig D (1994) Entwicklung produkt- und unternehmensorientierter Konstruktionsleitsysteme. Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hrsg. W. Beitz), Nr. 30, TU Berlin  
Kramer M (1993) Konstruktionsmanagement – eine Hilfe zur beschleunigten Produktentwicklung. Konstruktion 45:211–216  
Pahl G (Hrsg) (1994) Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ladenburger Diskurs, Köln: Verlag TÜV Rheinland  
Pahl G (1996) Wissen und Können in einem interdisziplinären Konstruktionsprozess. In: zu Putlitz G, Schade D (Hrsg) Wechselbeziehungen Mensch – Umwelt – Technik. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart (Englische Ausgabe: Interdisciplinary design: Knowledge and ability needed. ISR Interdisciplinary Science Reviews. Dez. 1996, Vol. 21, No. 4, 292–303)  
Stuffer R (1994) Planung und Steuerung der integrierten Produktentwicklung. Diss. TU München. Reihe Konstruktionstechnik München, Bd 13. Hanser München

- Tegel O (1996) Methodische Unterstützung beim Aufbau von Produktentwicklungsprozessen. Diss. TU Berlin. Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hrsg. W. Beitz), Nr. 35, TU Berlin
- VDI-Richtlinie 2807 (Entwurf) (1996) Teamarbeit – Anwendung in Projekten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung. VDI-Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung, Düsseldorf

### Abschnitt 3.3

- Bertsche B (2008) Reliability in automotive and mechanical engineering. Springer, Heidelberg
- Bertsche B, Schinköthe W, Göhner P, Wunderlich H-J, Jensen U (2009) Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Springer, Berlin
- DIN 25 424 Teil 1: Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen. Berlin: Beuth.
- Engel C, Quadejacob N (2008) Fünf Erfolgsfaktoren für Projekte. Sonderdruck Projektmagazin; Ausgabe 19
- Franke WD (1987) Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse in der industriellen Praxis. Moderne Industrie, Landsberg
- Harrant H, Hemmrich A (2004) Risikomanagement in Projekten. Carl Hanser, München
- Masing W (Hrsg) (1994) Handbuch der Qualitätssicherung, 3. Aufl. C. Hanser, München
- VDA (1986) Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie, Bd 4 – Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, 2. Aufl. VDA, Frankfurt a. M.

### Abschnitt 3.4

- Aumund-Kopp C et al (2008) Rapid Manufacturing – am Markt umgesetzte Verfahren und Prozessketten. In: Kollaska H (Hrsg) Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis 2008, Bd 24, S 181–196
- Beyer C (2002) Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten. Fortschritte in der Maschinenkonstruktion, Bd 4/2002. Aachen, Shaker (Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2002)
- Breitinger F, Pieverling J (2010) Die industrielle Umsetzung der Strategie Rapid Tooling; Homepage der Technischen Universität Dortmund, Stand: 09.2010, Deutschland: [http://www.isf.Maschinenbau.uni-dortmund.de/archiv/tagungen/3d\\_efahrungsforum\\_1999/forum3d/vortrage/Breiting.htm](http://www.isf.Maschinenbau.uni-dortmund.de/archiv/tagungen/3d_efahrungsforum_1999/forum3d/vortrage/Breiting.htm)
- Broschüre von MTT Group (2007) SLM® Materials 2007
- Bourell L, Leu C, Rosen W (2009) Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing. University of Texas
- DIN ISO 8062 (2003) Gusstechnologien – Begriffe und Einteilung. Beuth Verlag
- DIN 8580 (2003) Fertigungsverfahren – Begriffe und Einteilung. Beuth Verlag
- Deckard CR (1988) Selective Laser Sintering; Dissertation. University of Texas at Austin, USA
- Exner H, Ebert R (2008) Laser Technik Journal: Selektives Lasersintern – Präzise Bauteile schnell generiert – ein Überblick. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Heft 6, S 51–53
- Gebhardt A (2007) Generative Fertigungsverfahren, 3. Aufl. Carl Hanser Verlag, München
- Homepage der Alphaform AG (2010) <http://www.alphaform100.de> Stand: 09.2010
- Homepage (2010a) <http://www.notcot.org/post/2965/>. Stand: 09.2010
- Homepage (2010b) <http://www.janweigand.de/index.php?site=rapid> Stand: 09.2010
- Homepage (2010c) <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> Stand: 08.2010.

- Homepage der 3D Systems GmbH (2010) <http://www.3dsystems.com/>. Stand: 07.2010
- Homepage der EOS GmbH (2010) <http://www.eos.info/de>. Stand: 07.2010
- Homepage der G. W. P. AG, Deutschland (2010) <http://www.gwp-ag.de/de/leistungen/prototypenbau/rapidprototyping/selektives-lasersintern/index.html>. Stand: 08.2010
- Homepage der Realizer, Deutschland (2010) <http://www.realizer.com/startseite/slm-prototyping-maschinen>. Stand: 08.2010
- Homepage der MTT Group, Deutschland (2010) <http://www.mtt-group.de/selective-laser-melting.html>. Stand: 08.2010
- Homepage der Concept Laser, Deutschland (2010) <http://www.concept-laser.de/>. Stand: 08.2010
- Homepage der ObjectPlot, Deutschland (2010) <http://www.objectplot.de/3ddruck.php>. Stand: 08.2010
- Homepage der Z Corporation, Deutschland (2010) <http://www.zcorp.com/de/Products/3D-Printers/spage.aspx>. Stand: 08.2010
- Homepage der ProMetal RCT, Deutschland (2010) <http://www.prometal-rct.com/de>. Stand: 08.2010
- Homepage der Objet, Deutschland (2010) <http://de.objet.com>. Stand: 08.2010
- Homepage der Voxeljet Technology GmbH, Deutschland (2010) <http://www voxeljet de voxeljet/inhalt/unternehmen/produkteLeistungen.php?navid=1>. Stand: 08.2010
- Homepage der Stratasys Inc., USA (2010) <http://www.dimensionprinting.com/international/DE/>. Stand: 08.2010
- Homepage der Informationsseite für Rapid Technologie, Deutschland (2010) <http://www.rp-net.de/>. Stand: 08.2010
- Homepage der Rapid-Manufacturing GmbH, Deutschland (2010) <http://www.rapid-manufacturing.de/>. Stand: 08.2010
- Homepage der Stratasys Inc., USA (2010) [http://www.fortus.com/Fortus\\_Products.aspx](http://www.fortus.com/Fortus_Products.aspx). Stand: 08.2010
- Homepage der Leotech GmbH, Deutschland (2010) <http://www.leotech.de/Silikon-Vakuumguss.pdf>. Stand: 08.2010
- Homepage der PTZ-Prototypenzentrum GmbH, Deutschland (2010) <http://www.ptz-prototypen.de/>. Stand: 08.2010
- Homepage der Hördler rapid engineering-Prototypenbau, Deutschland (2010) [http://www.hoerdler.de/kunststoffvakuumguss/referenzen\\_urmodelle.html](http://www.hoerdler.de/kunststoffvakuumguss/referenzen_urmodelle.html). Stand: 08.2010
- Homepage der 1zu1 Prototypen GmbH & Co, Austria (2010) <http://www.1zu1prototypen.com/>. Stand: 08.2010
- Homepage der TEUFEL Prototypen GmbH, Deutschland: <http://www.teufel-prototypen.de/de/feinguss.html>
- Homepage der ZOLLERN Aluminium-Feinguss Soest GmbH & Co. KG, Deutschland (2010) <http://www.zollern-afs.de/centix/en/home.html>. Stand: 08.2010
- Homepage der GussStahl Lienen GmbH & Co. KG, Deutschland (2010) [http://www.gsl-linnen.de/cms/upload/bilder/Verknuepfungen\\_PDFs/Schema\\_Sandguss.pdf](http://www.gsl-linnen.de/cms/upload/bilder/Verknuepfungen_PDFs/Schema_Sandguss.pdf). Stand: 08.2010
- Homepage der Metallguss Rüther GmbH, Deutschland (2010) <http://www.ruether-guss.de/leistungen/guss/sand/index.htm>. Stand: 08.2010
- Homepage der CP-Centrum für Prototypenbau GmbH, Deutschland (2010) <http://www.cp-gmbh.de/>. Stand: 09.2010
- Homepage der Evonik Industries AG, Deutschland 2010) [http://www.degussahpp.com/dl/article/PDF\\_SD\\_882\\_883\\_Evonik\\_GIT1008.pdf](http://www.degussahpp.com/dl/article/PDF_SD_882_883_Evonik_GIT1008.pdf). Stand: 09.2010
- Homepage der promod™ GmbH, Deutschland (2010) <http://www.promod-technologie.de/>. Stand: 09.2010
- Homepage der Hasenauer & Hesser GmbH, Deutschland (2010) <http://www.hasenauer-hesser.de/>. Stand: 09.2010

- Homepage der Weber-KP GmbH, Deutschland (2010) <http://www.weber-kp.de/>, Stand: 09.2010
- Hempelmann W (2004) Rapid Prototyping auf dem Weg zum Rapid Manufacturing. In: Zäh MF, Reinhart G (Hrsg) Seminar Rapid Manufacturing – Vom Prototypen zur Produktion; iwb Seminarberichte 73. Herbert Utz Verlag, München, S 5-1-6-1
- Homepage der BASF Schweiz AG, Schweiz (2010) [http://www.xymara.com/inmyx/index/inmyx107/fav-200701-index/fav-200701-1\\_6afredisionis.htm](http://www.xymara.com/inmyx/index/inmyx107/fav-200701-index/fav-200701-1_6afredisionis.htm) Stand: 09.2010
- Hoyer J, Uhl C, Beyer C (2006) Virtual & Rapid Prototyping: Bestandsaufnahme aktueller Produkte und deren Einsatz. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 656. VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN 3-18-365602-7, ISSN 0178-9406
- Jacob P (1992) Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography. SME (Society of Manufacturing Engineers), USA
- Kaschka U (1999) Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid Tooling-Prozessketten. Shaker Verlag, Aachen
- Kochan HD (1993) Solid Freeform Manufacturing. Elsevier Ltd., Amsterdam
- Colbe C (2010) Strahlschmelzen – LaserCUSING® – Integration im Werkzeug- und Formenbau; FKT Formenbau und Kunststofftechnik GmbH, Triptis; in: RTejournal – Forum für Rapid Technologie, 7. Ausgabe
- Meiners W et al (1999) Vorrichtung für das selektive Laser-Schmelzen zur Herstellung eines Formkörpers; Europäische Patentschrift, EP1144146B1
- Nagy MS, Matyasi GY (2003) Analysis of STL files, Mathematical and Computer Modeling 38, S 945–960
- N. N. (2007) Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen; VDI 3404; VDI-Gesellschaft Produktions-technik (ADB); Beuth-Verlag, Berlin
- Reinhart G et al (2010) Rapid Tooling für den Magnesiumdruckguß; Homepage der apppex Product Development Prototypes Parts GmbH, Stand: 08.2010, Deutschland: <http://www.apppex.com/de/knowhow/aktikel4/aktikel4.htm>
- Stéphane D, Peter K (2008) Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik; Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen; RTejournal – Forum für Rapid Technologie; 5. Ausgabe
- Sagert D, Scholl I (2009) Vom Versuch zur Standardtechnologie – Laser Cusing-Werkzeugkerne aus Warmarbeitsstahl reduzieren Ausschussrate. In: Sonderdruck aus Gießerei-Erfahrungsaustausch, Bd 53, Heft 5. Gießerei Verlag, Düsseldorf, S 12–15
- Schöne C (2009) Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik. Verlag Dr. Hut, München (Habilitationsschrift)
- Turan HC (2002) Ein Anwendungsbeispiel zum Einsatz der Rapid Tooling Prozessketten – Die Fertigung von einem Oldtimer-Ersatzteil, IMW-Institutsmitteilung Nr. 27
- Wohlers T (2011) Wohlers Report 2011 – Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry; Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, Inc
- Zäh MF (2006) Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Carl Hanser Verlag, München

### Abschnitt 3.5

- AR (1994) RICHTLINIE 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen
- DIN 199 – Teil 1 (2002) Technische Produktdokumentation – CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten, Teil 1. Beuth Verlag GmbH, Begriffe

- DGI (1997) Richtlinie 97/23/EG über Druckgeräte: Pressure Equipment Directive (PED) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte
- Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) (2005) Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten vom 16. März 2005.
- Engineering Produktiv (2008) Engineering Produktiv: Ergebnispräsentation der Initiative Engineering produktiv! <http://www.digital-engineering-magazin.de/des/news/ergebnispraesentation-der-initiative-engineering-produktiv>. Zugriffen: 17. Dez 2012.
- Gröpper M (2010/2011) Dokumentation: Anspruchsvolle Aufgabe im PLM-Prozess. In: IT Production Product Lifecycle Management (PLM) Wissen kompakt, S 28–31
- Guess VC (2006) CMII for Business Process Infrastructure, 2. Ausgabe. Holly Publishing Verlag
- ISO/TS 16949 (2009) Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations
- Markowitz HM (1952) Portfolio selection. J Finance 3:77–91
- MR (2006) Maschinenrichtlinie: Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006
- Produkthaftungsgesetz (1989) Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte – ProdHaftG – vom 15. Dezember 1989 (BGBl. I S. 2198)
- Schabacker M (2001) Bewertung der Nutzen neuer Technologien in der Produktentwicklung. Buchreihe Integrierte Produktentwicklung, Bd 1, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Vajna S, Stark J (1997) Wirtschaftlichkeit von EDM-Systemen, Buch 4 der Reihe Von der analogen zur digitalen Reprografie. Herausgegeben von der Océ Deutschland GmbH Mülheim/Ruhr
- Vajna S (2003) Produktlebenszyklus-Management. FAZ Nr. 22/2003 vom 27.01.2003, S 24
- Vajna S, Schabacker M (2004) Mittelstandsinitiative PDM produktiv!. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99(4):187–191
- Vajna S (2010) Archivierung, Schnittstellen, PDM, Skript der Vorlesung, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- VDA 6.x (2011) Grundlagen für Qualitätsaudits, VDA-Bd. 6, Zertifizierungsvorgaben für VDA 6.1, VDA 6.2, VDA 6.4 auf Basis der ISO 9001. <http://www.vda-qmc.de/zertifizierung/vda-6x/vda-6x-si-faq/> (Stand 28.02.2011)
- VDI 2219 (2002) Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Beuth Verlag, Berlin
- VDI 4500 Blatt 1 (2006) Technische Dokumentation, Begriffsdefinitionen und rechtliche Grundlagen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- VDMA (2005) Entscheidungshilfe zur Einführung von PDM-Systemen. VDMA-Verlag GmbH
- VDMA (2007) Leitfaden Übersetzungsmanagement in der Technischen Dokumentation. VDMA-Verlag GmbH
- VDMA (2008) Leitfaden zur Erstellung eines unternehmensspezifischen PLM-Konzeptes. VDMA-Verlag GmbH
- VDMA (2010) Leitfaden Einführung eines Redaktionssystems für die Technische Dokumentation. VDMA-Verlag GmbH
- Wiendahl H-P (1970) Funktionsbetrachtungen technischer Gebilde – Ein Hilfsmittel zur Auftragsabwicklung in der Maschinenbauindustrie. Dissertation RWTH Aachen

## Abschnitt 3.6

- Lashin G (2006) Engineering Change Management für globale Produktentwicklung. Product Life live 2006. VDE Verlag GmbH, Berlin
- DIN 199-Teil 4 (1981) Begriffe im Zeichnungs- und Stücklistenwesen – Änderungen. Beuth-Verlag GmbH, Berlin 10.
- VDA 4965-Part 0 (Version 3.0) (2010) Engineering Change Management. Verband der Automobilindustrie (VDA) 1. Frankfurt a. M.
- VDA 4965-Part 1 (Version 3.0) (2010) Engineering Change Request (ECR). Verband der Automobilindustrie (VDA) 1. Frankfurt a.M.
- Lindemann U, Reichwald R (Hrsg) (1998) Integriertes Änderungsmanagement. Springer, Berlin

## Abschnitt 3.7

- Coenenberg AG, Fischer TM, Günther T (2009) Kostenrechnung und Kostenanalyse, 7. Auflage. Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- DIN 32 990, Teil 1 (1990) Kosteninformationen, Begriffe zu Kosteninformationen in der Maschinenindustrie. Beuth, Berlin
- Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U (2007) Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 6. Aufl. Springer, Berlin
- Feldhusen J, Gebhardt B (2008) Product Lifecycle Management für die Praxis, 1. Aufl. Springer, Berlin
- Franz K-P, Kajüter P (Hrsg) (2002) Kostenmanagement: Wertsteigerung durch systematische Kostensteuerung, 2. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Geißdörfer K (2009) Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC) Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA, 1. Aufl. LIT Verlag, Berlin
- Göpfert J (1998) Modulare Produktentwicklung. Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden
- Götze U (2010) Kostenrechnung und Kostenmanagement, 5. Aufl. Springer, Berlin
- Horváth P (2006) Controlling, 10. Aufl. Verlag Franz Vahlen, München
- Horváth P, Arnout A (2001) Target Costing in der deutschen Unternehmenspraxis. Verlag Franz Vahlen, München
- Jorden W (2012) Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis, 7. Aufl. Carl Hanser Verlag, München
- Klein B (2006) Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München
- Kurz U, Hintzen H, Laufenberg H (2009) Konstruieren, Gestalten, Entwerfen, 4. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden
- Lindemann U, Reichwald R, Zäh MF (2006) Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer, Berlin
- Neff T (2002) Front load costing. Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden
- Plinke W, Rese M (2006) Industrielle Kostenrechnung – Eine Einführung. 7. Aufl. Springer, Berlin
- Sabisch H, Tintelnot C (1998) Integriertes Benchmarking. Springer, Berlin
- Schweitzer M, Küpper H-U (2008) Systeme der Kosten- und Erlösrechnung, 9. Aufl. Verlag Franz Vahlen, München
- Starke L, Meyer B-R (2004) Toleranzen, Passungen und Oberflächengüte in der Kunststofftechnik, 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, München
- VDMA 34160 (2006) Richtlinie des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, VDMA Einheitsblatt 34160:2006, Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen, 2006.

- VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2 (1998) Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Tabellenwerk, Düsseldorf, VDI
- VDI-Richtlinie 2234 (1990) Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur, Düsseldorf, VDI
- VDI-Richtlinie 2235 (1987) Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen, Düsseldorf, VDI
- VDI-Richtlinie 2884 (2005) Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)

### Abschnitt 3.8

- Bahke T (2009a) Ergebnisse der 61. ordentlichen Sitzung des Präsidiums des DIN e. V. DIN-Mitteilungen, Berlin (Januar), S 4–7
- Bahke T (2009b) Innovation mit Normen und Standards. Hannover Messe, Hannover (21. April)
- Bahke T (2009c) Workshop des DIN-Präsidiums ISO Strategie 2011–2015, Internationale Normungspolitik aus deutscher Sicht. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (22. Juni)
- Bahke T (2010) Ergebnisse der 62. ordentlichen Sitzung des Präsidiums des DIN e. V. DIN-Mitteilungen, Berlin (Februar), S 4–10
- Bahke T (2012) Normung. In Hütte Ingenieurwissen, 34. Aufl. Springer, Berlin
- BDI e. V. (2008) Normung zukunftsfähig gestalten – Positionspapier. Bundesverband der deutschen Industrie e. V., Berlin (März)
- Bessling S, Bormann E, Müller N (2009) Einbindung von KMU in Normungsprozesse. IMW-Institutsmitsellung Nr. 34
- Beuth Verlag GmbH (2010) [www.beuth.de](http://www.beuth.de), Dienstleister für Norm- und Fachpublikationen
- Blind K (2009a) European Studies on the Economic Impact of Standards: Approaches, Results and Future Challenges. Berlin: Berlin University of Technology, Faculty of Economics and Management, chair of Innovation Economics, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Chair of Standardisation at the Rotterdam School of Management
- Blind K (2009b) Antragsskizze zur Basisuntersuchung im Rahmen der Initiative Innovation mit Normen und Standards für 2010. Technische Universität Berlin, Berlin, Stand 14. August 2009
- Blind K, Jungmittag A (2008) The impact of patents and standards on macroeconomic growth: a panel approach covering four countries and 12 sectors. J Prod Anal Springer US 29(1):51–60 (Februar)
- Blind K, Gauch S (2009) Research and standardisation in nanotechnology: evidence from Germany. J Technol Trans 34(3):320–342 (Juni)
- Blind K, Mangelsdorf A (2009) Aktuelle Herausforderungen für die Normung und mögliche Lösungen – Umfrage zur Beteiligung an der Normungsarbeit, Zugang zu Normeninformationen und Anwendung von Normen. Technische Universität Berlin/Fraunhofer-Institut, Berlin, ZVEI/VDMA-Report, April 2009
- Bohnsack U (2009) Aktuelle Regularien des DIN zum Umgang mit Patenten, Workshop Normen und Patente. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (02. Oktober)
- Bormann E, Kramer W, Müller N (2007) Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards. Beuth, Berlin (März)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2006) Die Hightech-Strategie für Deutschland. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat für Öffentlichkeitsarbeit, Bonn
- CEN/CENELEC, CEN/CENELEC (2010) Guide 8, CEN-CENELEC Guidelines for Implementation of the Common IPR Policy. CEN/CENELEC, Januar 2010

- DIN 820, Normenreihe zur Normungsarbeit. Beuth, Berlin
- DIN 820-1 (2009) Normungsarbeit – Teil 1: Grundsätze. Beuth, Berlin
- DIN 820-2 (2009) Normungsarbeit – Teil 2: Gestaltung von Dokumenten. Anhang F. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 9001 (2008) Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2008); Dreisprachige Fassung EN ISO 9001:2008. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 50001 (2011) Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Beuth, Berlin
- DIN e. V. (1975) Vertrag zwischen der Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister für Wirtschaft, und dem DIN Deutsches Institut für Normung e. V., vertreten durch dessen Präsidenten. DIN e. V., Berlin (05. Juni 1975)
- DIN e. V. (2000) Gesamtwirtschaftlicher Nutzen der Normung. Beuth, Berlin
- DIN e. V. (2004) Die Deutsche Normungsstrategie. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN e. V. (2009a) Aktueller Stand der Arbeiten im NA 095–04–02 AA Grundlagen des Risikomanagements. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Mai 2009
- DIN e. V. (2009) Bedarf von KMU an einer anwendergerechten Aufbereitung von Norminhalten, Abschlussbericht 2008– Basisuntersuchung IV. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 21. April 2009.
- DIN e. V. (2009b) Finanzierung der Normung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN e. V. (2009c) DIN – mehr als DIN A4. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN e. V. (2009d) Die kombinierte Anwendung verschiedener Managementsystem-Normen. Beuth, Berlin
- DIN e. V. (2010a) Die Deutsche Normungsstrategie aktuell. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN e. V. (2010b) www.ins.din.de. Stand März 2010
- DIN e. V. (2010c) www.din.de. Stand März 2010
- DIN e. V. (2010d) www.spec.din.de. Stand März 2010.
- DIN e. V. (2010e) DIN Büro, Stand Februar 2010.
- DIN Software GmbH (2010) www.dinsoftware.de, Normeninformationen für Geschäftsprozesse
- DIN e. V.: NormenWerk.
- DIN e. V.; j2consult: Leitfaden für die Ermittlung des Nutzens von DIN-Normen. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN e. V. (2010) INS Flyer Informationen 2006–2010. www.ins.din.de.
- Erk P (2009) Rechtliche Aspekte; Workshop Normen und Patente. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (Oktober)
- Europäische Union (2003) Konsolidierte Fassungen des Vertrags über die Europäische Union und des Vertrags zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 2002/C 325/01, 01. Februar 2003
- Fluthwedel A (2009) Antworten des DIN auf die Herausforderungen der Managementsystemnormung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (Juni)
- Gaub H (2009a) The Economics of Standardization. TBT Committee Workshop on the Role of International Standards in Economic Development. Genf, 16.–17. März 2009
- Gaub H (2009b) Internationaler Marktzugang für Innovationen durch standardisierte und transparent finanzierte Normungsprozesse, 36. Konferenz Normenpraxis. Berlin, 24.–25. September 2009.
- Gaub H (2010) Strategische Normung. Vorlesung TU Berlin, DIN e. V., April 2010
- Gindele K (2009) Die normungspolitische Konzeption der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin
- Glauner C (2007) Normen und Standards – Erfolgsfaktor für Innovationen. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin

- Glos M (2007) Europäische Konferenz Innovation und Marktfähigkeit durch Normung. Berlin, 26.-27. März 2007
- Hager R (2008) Das Normprojekt ISO 26000 Guidance on Social Responsibility. Sustainability Leadership Forum, 18. Juni 2008
- Hartlieb B, Kiehl P, Müller N (2009) Normung und Standardisierung – Grundlagen. Beuth, Berlin
- Hertel L, Klaiber E, Wallner U (2010) Technische Regeln systematisch managen – Ein Leitfaden für den Aufbau und Betrieb eines rechnergestützten innerbetrieblichen Dokumentenmanagements. 2. Auflage. Beuth, Berlin
- ISO (2010) ISO Strategic Plan 2005–2010. [www.iso.org](http://www.iso.org).
- ISO: [isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/3770791/Common\\_Policy.htm](http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/3770791/Common_Policy.htm)
- Marschall H-W, Mohr C (1985) Fünf Jahre DITR – eine Bestandsaufnahme. DIN-Mitteilungen + elektronorm 64(1):18–25
- Müller N, Bessling S, Bormann E (2009) Einbindung von kleinen und mittleren Unternehmen in Normungsprozesse. DIN-Mitteilungen April 2009, S 15–20
- Perinorm (2010), Stand März 2010
- Portal zur Normenverwaltung: DITR-Datenservice – Individuell zusammengestellte Datenlieferungen für Ihre Normenverwaltung, Lieferbare Datenfelder und Datenpakete. [www.beuth.de](http://www.beuth.de) Normenverwaltung DITR-Datenservice
- Schacht M (1991) Methodische Neugestaltung von Normen als Grundlage für eine Integration in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. DIN-Normungskunde 28. Beuth, Berlin
- Schacht M, Loerzer M, Müller Roy (2012) Produktkonformität und CE-Kennzeichnung – Wer ist im Unternehmen verantwortlich? 2. Auflage. Beuth, Berlin
- Schacht M, Hertel L (2009) Notwendigkeit und Nutzen von Normeninformationen in Geschäftsprozessen. DIN-Mitteilungen Juli 2009, Seite 24 bis 30
- Schacht M (2012) Erfolgsfaktor Normenmanagement – Best Practice. DIN-Mitteilungen April 2012, S 27–33
- Schambach B (2009) Aktuelle Produktpalette des DIN. Gemeinschaftstagung Schweißtechnische Normen und Regelwerke – Garant für Qualität, Sicherheit und Erfolg, Berlin, 13. Mai 2009
- Schlüter I, Behrens H (2009) Was ist Entwicklungsbegleitende Normung? DIN-Mitteilungen April 2009, S 4–7
- Schubert, S (2009) Normung als integraler Bestandteil der Vereinheitlichungsmöglichkeiten eines Unternehmens. DIN-Mitteilungen Februar 2009, S 18–24
- Susanto A (1988) Methodik zur Entwicklung von Normen. DIN-Normungskunde 23. Beuth, Berlin
- Vertrag von Lissabon, Amtsblatt der Europäischen Union 2008/C 115/01 (2008) zur Änderung des Vertrags über die Europäische Union und des Vertrags zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft. 1. September 2009
- Vladova G, Weber E (2009) Bedarf von KMU für anwendergerechte Aufbereitung von Normeninhalten. DIN-Mitteilungen April 2009, S 22–29
- Weitkämper N (2008) Trends – In der Suche ist das Raumschiff Enterprise gerade gestartet. Password 10/2008, S 8–9
- WTO – Committee on Technical Barrier to Trade (2009) The economic rationale for standardisation, 10. März 2009
- Wucherer K (2006) IEC-Jahrestagung, 25.–29. September 2006, Berlin

### Abschnitt 3.9

- Arora A, Ceccagnoli M (2004) Patent Protection, Complementary Assets, and Firms' Incentives for Technology Licensing, *Management Science*, Bd. 52, S. 293–308, 2006.
- Arundel A, Kabla I (1998) What Percentage of Innovations are Patented? Empirical Estimates for European Firms, *Res Policy* 27(2):127–141
- Bayerischer Industrie- und Handelskammertag (2007) Patentinformation – Wettbewerbsvorsprung im Innovationsprozess, 1. Aufl.
- Bartenbach K, Volz F-E (2012) Arbeitnehmererfindergesetz, 5. Aufl. Carl Heymanns Verlag, Köln
- Blaxill M, Eckardt R (2009) The invisible edge. Taking your strategy to the next level using intellectual property, Portfolio
- Bendl E, Weber G (2008) Patentrecherche und Internet, 3. Aufl. Carl Heymanns Verlag, Köln
- Benkard (2006) Patentgesetz, 10. Aufl. Verlag C. H. Beck, München
- Busse (2003) Patentgesetz, 6. Aufl. De Gruyter Recht, Berlin
- Ceccagnoli M, Gambardella A, Giuri P, Licht G, Mariani M (2005) Study on evaluating the knowledge economy – what are patents actually worth? Tender no Markt/2004/09/E, Final Report for Lot 1
- Cohausz H (1996) Info & Recherche, Thomson Reuters Professional
- Cohen W (2002) Patents: Their Effectiveness and Role, Vortrag anlässlich der FTC/DOJ Hearings on Competition and Intellectual Property Law in the Knowledge-Based Economy
- Cohen W, Merrill S (2003) Patents in the knowledge-based economy. The National Academies Press
- Cohen W, Nelson R, Walsh J (2000) Protecting Their Intellectual Assets: Appropriability Conditions and Why U.S. Manufacturing Firms Patent (or Not), NBER Working Paper NR.W 7552
- Cohen W, Goto A, Nagata A, Nelson R, Walsh J (2002a) R&D spillovers, patents and the incentives to innovate in Japan and the United States. *Res Policy* 31:1346–1367
- Deutsches Patent- und Markenamt (2008) DPMAnformativ INID-Codes, Ausgabe März 2008.
- Däbritz E (2008) Patente. Wie versteht man sie? Wie bekommt man sie? Wie geht man mit ihnen um? 3. Aufl. Verlag C. H. Beck, München
- Dolmans M (2002) Standards for Standards, Paper for American Bar Association, Section of Antitrust law, Session on Trade Associations and for the Joint Department of Justice Antitrust Division/Federal Trade EC Commission hearings on Competition and Intellectual Property Law and Policy in the Knowledge-Based Economy, Session on Comparative Law Topics: Licensing of Intellectual Property in Other Jurisdictions
- Eichmann H, von Falckenstein R (2005) Geschmacksmustergesetz, 3. Aufl. Verlag C. H. Beck, München
- Engelhardt K (1988) Fachwissen Patentinformation, Klaes, Essen
- Erk P, Blumenröder U (2010) Patente und Normen – Die Situation in Deutschland, DIN Mitteilungen 11, S 18–23
- Fröhlich M (2008) Standards und Patente – Die ETSI IPR Policy, GRUR, S 205–218
- Gambardella A (2002) 'Successes' and 'Failures' in the markets for technology. Oxford Eco Policy 18(1):52–62
- Gambardella A, Harhoff D, Verspagen B (2005) The Value of European Patents, 2005
- Gambardella A, Giuri P, Luzzi A (2006) The market for patents in Europe, LEM Working Paper Series, 2006
- Gauch S (2007) Marken als Innovationsindikator, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 12-2007, Fraunhofer Institut
- Harabi N (1995) Appropriability of technical innovations, an empirical analysis. *Res Policy* 24(6):981–992
- Horvath P (1996) Online-Recherche. Vieweg Verlag, Braunschweig
- Kraßer R (2009) Patentrecht, 6. Aufl. Verlag C.H. Beck, München

- Lévèque F, Ménière Y (2006) Patents and Innovation: Friends or Foes? Centre d'économie industrielle Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- Mayer R (2003) Das US-Patent, 3. Aufl. Carl Heymanns Verlag
- OECD (2008) Die wirtschaftlichen Folgen von Produkt- und Markenpiraterie
- Oppenländer K (1977) Die Wirkungen des Patentwesens im Innovationsprozess, GRUR, S 362–370
- Oppenländer K (1982) Die wirtschaftspolitische Bedeutung des Patentwesens aus der Sicht der empirischen Wirtschaftsforschung, GRUR Int., S 598–604
- Philippus T (1997) Internet. VDE-Verlag, Berlin
- Potempa T, Franke P, Osowski W (2001) Informationen finden im Internet, 2. Aufl. Hanser Verlag, München
- Rammer C (2007) Innovationsverhalten der Unternehmen in Deutschland 2005; Aktuelle Entwicklungen – öffentliche Förderung – Innovationskooperationen – Schutzmaßnahmen für geistiges Eigentum, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 13-2007, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung
- Rammer C (2002a) Patente und Marken als Schutzmechanismen für Innovationen, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 11–2003, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung
- Rammer C (2002b) Innovationsverhalten der Unternehmen, Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 12–2003, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung
- Rebel D (2009) Gewerbliche Schutzrechte, 6. Aufl. Carl Heymanns Verlag, Köln
- Schulte R (2008) Patentgesetz, 8. Aufl. Carl Heymanns Verlag, Köln
- Singer M, Stauder D (2010) Europäisches Patentübereinkommen, 5. Aufl. Carl Heymanns Verlag, Köln
- Tiefel T (Hrsg) (2007) Gewerbliche Schutzrechte im Innovationsprozess, 1. Aufl. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden
- Ullrich H (2007) Patente, Wettbewerb und Technische Normen: Rechts- und Ordnungspolitische Fragestellungen, GRUR, S 817–830
- Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2007) Gutachten Patentschutz und Innovation
- World Intellectual Property Organization (2004) WIPO Intellectual Property Handbook, WIPO Publication Nr. 489(E), 2. Aufl.
- World Intellectual Property Organization: Understanding Industrial Property, WIPO Publication No. 895(E)
- World Intellectual Property Organization: PATENTSCOPE, WIPO Guide to Using PATENT INFORMATION, WIPO Publication No. L434/3(E)
- Wurzer A (2003) Wettbewerbsvorteile durch Patentinformationen, 2. Aufl. Fachinformationszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen
- Wurzer A, Reinhardt D (2006) Bewertung technischer Schutzrechte. Carl Heymanns Verlag, Köln
- Wurzer A (2009) IP-Manager. Carl Heymanns Verlag, Köln

---

# Technische Systeme

# 4

Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Jan Göpfert und Gerhard Tretow

Bevor die Vorgehensweise und Schritte beim Entwickeln und Konstruieren behandelt werden, sollen in den folgenden Abschnitten die wesentlichen Begriffe technischer Produkte so, wie sie in diesem Werk verwendet werden, erläutert werden. Es wurde verdeutlicht, dass es in der Praxis keinen einheitlichen Wortgebrauch für maschinenbauliche Produkte und Teile von diesen gibt. Deshalb ist es im Rahmen einer Auftragsabwicklung mit meistens vielen Beteiligten besonders wichtig, diesen zu klären, um Missverständnisse und daraus resultierende Fehlleistungen zu vermeiden.

Das Verständnis für die Aufgabe und Funktionsweise und damit für die Entwicklungs- bzw. Konstruktionsaufgabe wird deutlich verbessert, wenn die Flüsse von Energie, Stoff und Signal durch das betrachtete Produkt analysiert und beschrieben werden. Hierin soll Kap. 4.2 unterstützen. Produkte sollen Funktionen erfüllen, jedoch ist es in der Praxis meistens nicht ohne Weiteres möglich, die Gesamtfunktion eines Produkts direkt zu realisieren. In Kap. 4.3 wird deshalb das Vorgehen zur Funktionsdefinition in Form von Funktionsstrukturen erläutert. Funktionen sind lösungsneutrale Beschreibungen von Pro-

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische  
Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

J. Göpfert · G. Tretow

ID-Consult GmbH, Irmgardstraße 1, 81479 München, Deutschland  
E-Mail: jan.goepfert@id-consult.com

G. Tretow

E-Mail: gerhard.tretow@id-consult.com

duktaufgaben. Zur prinzipiellen Realisierung von Funktionen muss das Zusammenwirken von physikalischen Effekten, Effektträgern, meistens Werkstoffen, und deren grundsätzlicher Gestaltung in Form einer Wirkstruktur festgelegt werden. Dieses Vorgehen wird in Kap. 4.4 beschrieben. Der sich aus dem Wirkzusammenhang ergebende bauliche Zusammenhang der Komponenten eines Produkts wird in Abschn. 4.4.1 beschrieben. Die meisten Produkte sind Teile eines größeren Systems zur Erfüllung einer Aufgabe. Auf diesen Systemzusammenhang wird im Abschn. 4.4.2 eingegangen.

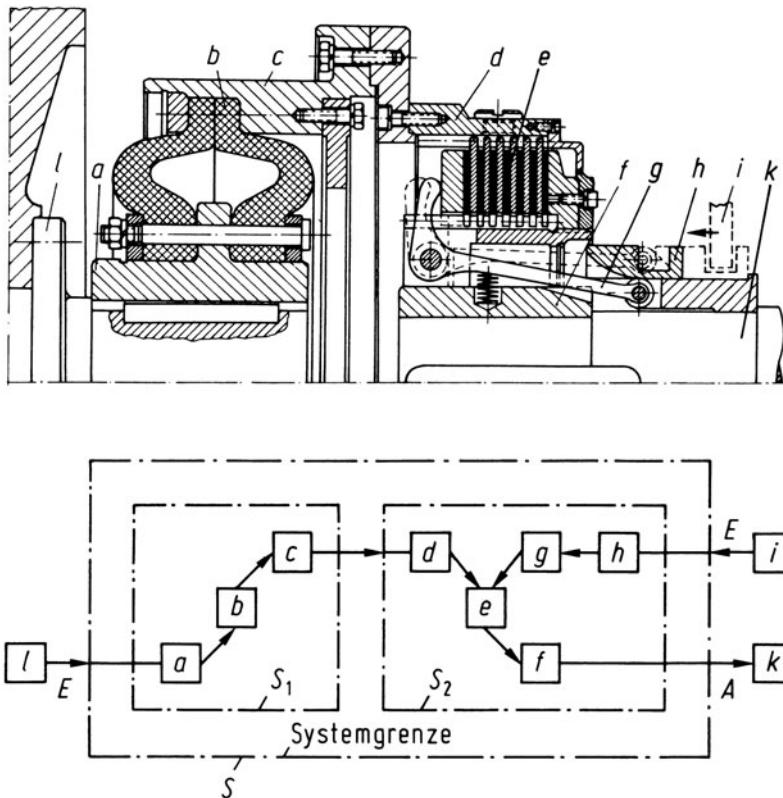
---

## **4.1 System, Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Einzelteil (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)**

Die Lösung technischer Aufgaben wird mit Hilfe *technischer Gebilde* erfüllt, die als Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Maschinenelement oder Einzelteil bezeichnet werden. Diese bekannten Bezeichnungen sind grob nach dem Grad ihrer Komplexität geordnet. Je nach Fachgebiet und Betrachtungsstufe ist die Verwendung dieser Bezeichnung u. U. unterschiedlich. So wird z. B. ein Apparat (Reaktor, Verdampfer usw.) als ein Glied bzw. Element höherer Komplexität in einer Anlage angesehen. In bestimmten Bereichen werden technische Gebilde als Anlagen bezeichnet, andernorts als Maschinen oder Maschinenanlagen. Eine Maschine setzt sich aus Baugruppen und Einzelteilen zusammen. Geräte zum Steuern und Überwachen werden sowohl in Anlagen als auch in Maschinen eingesetzt. Ein Gerät kann aus Baugruppen und Einzelteilen bestehen, vielleicht ist eine kleine Maschine sogar Teil dieses Gerätes. Ihre Benennung ist aus der geschichtlichen Entwicklung und dem jeweiligen Verwendungsbereich erklärbar. Es gibt Normungsbestrebungen, energieumsetzende technische Gebilde als Maschinen, stoffumsetzende als Apparate und signalumsetzende als Geräte zu bezeichnen. Die bisherige Diskussion hat gezeigt, dass eine strenge Einteilung nach diesen Merkmalen nicht immer möglich oder im Hinblick bereits eingeführter Begriffe nicht immer zweckmäßig ist.

Vorteilhaft ist der Vorschlag von Hubka (1984); Hubka und Eder (1988, 1992) in Übereinstimmung mit der systemtechnischen Betrachtung, die technischen Gebilde als Systeme aufzufassen, die durch *Eingangsgrößen* (Inputs) und *Ausgangsgrößen* (Outputs) mit ihrer Umgebung in Verbindung stehen. Was zum betrachteten System gehört, wird durch die Systemgrenze jeweils festgelegt. Die Ein- und Ausgangsgrößen überschreiten die *Systemgrenze* (Systemtechnik). Ein System kann in Teilsysteme untergliedert werden. Mit dieser Vorstellung ist es möglich, auf jeder Stufe der Abstraktion, der Einordnung oder der Aufgliederung für den jeweiligen Betrachtungszweck geeignete Systeme zu definieren. In der Regel sind sie Teile eines größeren übergeordneten Systems.

Ein konkretes Beispiel ist die in Abb. 4.1 dargestellte kombinierte Kupplung. Sie ist als ein System „Kupplung“ aufzufassen und stellt innerhalb einer Maschine oder zwischen zwei Maschinen eine Baugruppe dar, während für diese Baugruppe selbst die beiden *Teilsysteme* „Elastische Kupplung“ und „Schaltkupplung“ wiederum selbstständige Baugruppen sein können. Das Teilsystem „Schaltkupplung“ ließe sich weiter in die Systemelemente, hier „Einzelteile“, zerlegen.



**Abb. 4.1** System „Kupplung“, a . . . h Systemelemente (beispielsweise); i . . . l Anschluselemente; S Gesamtsystem;  $S_1$  Teilsystem „Elastische Kupplung“;  $S_2$  Teilsystem „Schaltkupplung“; E Eingangsgrößen (Inputs); A Ausgangsgrößen (Outputs)

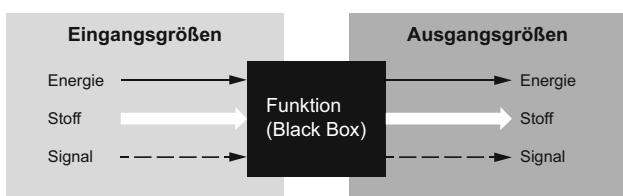
Das in Abb. 4.1 dargestellte System orientiert sich an der Baustruktur. Es ist aber auch denkbar, es nach Funktionen zu betrachten. Man könnte das Gesamtsystem „Kuppeln“ funktionsorientiert in die Teilsysteme „Ausgleichen“ und „Schalten“ gliedern, das letztere Teilsystem wiederum in die Untersysteme „Schaltkraft in Normalkraft ändern“ und „Reibkraft übertragen“.

Zum Beispiel könnte das Systemelement g auch als ein Untersystem aufgefasst werden, das die Funktion hätte, die aus dem Schaltring kommende Kraft in die größere auf die Reibflächen wirkende Normalkraft zu ändern und durch seine Nachgiebigkeit einen begrenzten Verschleißausgleich zu ermöglichen.

Wie und nach welchen Gesichtspunkten gegliedert wird, hängt vom Zweck der Betrachtung ab. Häufige Gesichtspunkte sind

- die Funktion, um funktionelle Zusammenhänge zu erkennen oder zu beschreiben,
- Montagebaugruppen, um Montageoperationen zu planen,
- Fertigungsmodule, um Fertigungsoperationen zu gliedern oder zusammenzufassen.

**Abb. 4.2** Umsatz von Energie, Stoff und Signal mit eindeutigem funktionalem Zusammenhang, aber unbekannter Lösung



Je nach Zweck können solche Systemunterteilungen nach solchen unterschiedlichen Gesichtspunkten mehr oder weniger weit getrieben werden. Der Konstrukteur muss für die einzelnen Zwecke solche Systeme bilden und sie mit ihren Ein- und Ausgängen durch die Systemgrenze gegenüber der Umgebung deutlich machen. Dabei kann er die ihm gewohnte oder allgemein übliche Bezeichnung beibehalten.

## 4.2 Energie-, Stoff- und Signalumsatz (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Grundsätzlich dienen technische Artefakte, also von Menschen geschaffene künstliche Gebilde, dazu etwas zu bewirken. Dieses „Bewirken“ ist die Funktion des Artefakts und wird in Kap. 4.3 behandelt. Wie in der Mathematik sollen auch hier die Funktionen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Eingang und dem Ausgang beschreiben. Unabhängig vom alltäglichen Sprachgebrauch können grundsätzlich drei Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen unterschieden werden. Es sind dies die Energie, der Stoff und das Signal. Entsprechend hat ein technisches Artefakt einen Energie-, Stoff- oder Signalumsatz, s. Abb. 4.2. Die zur Erfüllung der Aufgabe umzusetzende Funktion wird auch als „Black Box“ bezeichnet, um zu verdeutlichen, dass hierfür eine technische Lösung gesucht wird. Gleichzeitig wird die Lösungsneutralität hervorgehoben.

Analysiert man die technischen Systeme, die Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe oder Einzelteil genannt werden, so wird offenbar, dass sie einem technischen Prozess dienen, in dem Energien, Stoffe und Signale geleitet und/oder verändert werden. Bei Änderung haben wir es mit dem Energie-, Stoff- und/oder Signalumsatz zu tun, wie es Rodenacker (1991) formuliert und dargestellt hat.

Der Umsatz von Energie betrifft, z. B. in einem Elektromotor, die Wandlung elektrischer in mechanische Energie sowie in thermische Energie als Nebengröße. Die chemische Energie eines Brennstoffs wird beim Verbrennungsmotor ebenfalls in thermische und mechanische Energie gewandelt.

Stoffe können verschiedene Veränderungen erfahren. Viele Stoffe werden gemischt, getrennt, gefärbt, beschichtet, verpackt, transportiert oder in andere Zustände überführt. Aus Rohstoffen entstehen Halzeug und Fertigprodukte. Mechanisch bearbeitete Teile erhalten besondere Oberflächen, Produkte durchlaufen Veredelungsanlagen, Teile werden zwecks Prüfung zerstört.

In jeder Anlage sind Informationen zu verarbeiten. Mit Hilfe von Signalen werden diese eingegeben, gesammelt, aufbereitet, weitergeleitet, mit anderen verglichen oder verknüpft, ausgegeben, angezeigt, registriert.

In den technischen Prozessen ist von der Aufgabe oder von der Art der Lösung her entweder der Energie-, Stoff- oder Signalumsatz dominierend. Es ist zweckmäßig, diesen dann in Form eines Flusses als Hauptfluss zu betrachten. Meistens ist ein weiterer Fluss begleitend, häufig sind alle drei beteiligt. So gibt es keinen Stoff- oder Signalfluss ohne einen begleitenden Energiefloss, auch wenn die benötigte Energie sehr klein ist oder problemlos bereitgestellt werden kann. Die Probleme der Energiebereitstellung oder des Energieumsatzes sind dann nicht dominierend, sie treten u. U. in den Hintergrund, aber der Energiefloss bleibt notwendig. Dabei kann es sich auch um den in der Komponente vorhandenen Fluss wie z. B. Kraft, Drehmoment, Strom usw. handeln, der dann als Kraftfluss, Drehmomentfluss oder Stromfluss bezeichnet wird.

Der Energieumsatz zur Gewinnung z. B. von elektrischer Energie ist mit einem Stoffumsatz verbunden. In einem Steinkohlenkraftwerk ist der kontinuierliche Stofffluss direkt sichtbar. Der begleitende Signalfloss ist zur Steuerung und Regelung des gesamten Prozesses ein wichtiger Nebenfluss.

Andererseits werden in vielen Messgeräten, ohne einen Stoffumsatz zu bewirken, Signale aufgenommen, gewandelt oder angezeigt. In manchen Fällen muss hierfür Energie bereitgestellt werden, in anderen kann latent vorhandene Energie ohne Weiteres genutzt werden. Jeder Signalfloss ist mit einem Energiefloss verbunden, ohne immer einen Stofffluss bewirken zu müssen.

Für die weiteren Betrachtungen gelten folgende Definitionen:

Energie: mechanische, thermische, elektrische, chemische, optische Energie, aber auch Kraft, Strom, Wärme ...

Stoff: Gas, Flüssigkeit, feste Körper, Staub, aber auch Rohprodukt, Material, Prüfgegenstand, Behandlungsobjekt, Endprodukt, Bauteil, geprüfter oder behandelter Gegenstand ...

Signal: Messgröße, Anzeige, Steuerimpuls, Daten, Informationen ...

Im Rahmen dieses Buches werden technische Systeme

- mit dem Hauptfluss Energie als „Maschine“,
- mit dem Hauptfluss Stoff als „Apparat“
- und mit dem Hauptfluss Signal als „Gerät“

bezeichnet. Dies ist allerdings häufig nicht mit dem Sprachgebrauch deckungsgleich. Ein Telefonapparat hat als Hauptumsatz „Signal“ und ist nach der hier eingeführten Nomenklatur ein Gerät. Ein elektrischer Stromrichter mit dem Hauptfluss „Energie“ ist entsprechend eine Maschine.

Bei jedem Umsatz der beschriebenen Größen müssen Quantität und Qualität beachtet werden, um eindeutige Kriterien für die Präzisierung der Aufgabe, für die Auswahl der Lösungen und für eine Bewertung zu erhalten. Jede Aussage ist nur dann präzisiert, wenn sowohl deren Quantitäts- als auch Qualitätsaspekte berücksichtigt werden. So ist z. B. die

Angabe: „100 kg/s Dampf von 80 bar und 500 °C“ als Eintrittsmenge für die Auslegung einer Dampfturbine erst dann ausreichend präzisiert, wenn bestimmt wird, dass es sich um die Nenndampfmenge und nicht z. B. um die maximale Schluckfähigkeit handeln soll und dass ferner die dauernd zulässige Schwankungsbreite des Dampfzustandes z. B. mit 80 bar  $\pm$  5 bar und 500 °C  $\pm$  10 °C festgelegt, also um einen Qualitätsaspekt erweitert wurde.

Für sehr viele Anwendungen ist weiterhin eine sinnvolle Bearbeitung nur möglich, wenn die Eingangsgrößen in ihren Kosten bzw. ihrem Wert bekannt sind oder angegeben wurde, zu welchen Kosten die Ausgangsgrößen höchstens erstellt werden dürfen (vgl. Rodenacker 1991; Kategorien: Menge – Qualität – Kosten).

In technischen Systemen findet also ein Umsatz von Energie, Stoff und/oder Signal statt, der durch Quantitäts-, Qualitäts- und Kostenangaben präzisiert werden muss, s. Abb. 4.2.

---

## 4.3 Funktionszusammenhang (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Jedes Produkt dient dazu, eine Funktion zu erfüllen. Die Art der erfüllten Funktion hängt dabei von der Art des Produkts und dem Kontext ab, innerhalb dessen es verwendet wird. Im Rahmen dieses Werks soll mit Funktion die Erfüllung einer technischen Aufgabe gemeint sein, so ist z. B. ein „Moment vergrößern“ eine Funktion, die ein Getriebe erfüllt. Anzeigefunktionen (Brezing 2005), die dazu dienen, eine Produktaussage zu generieren, beispielsweise „kraftvolles Produkt“, oder den sozialen Status des Besitzers zu erhöhen, werden hier nicht behandelt. Sie sind insbesondere bei Konsumgütern von Bedeutung.

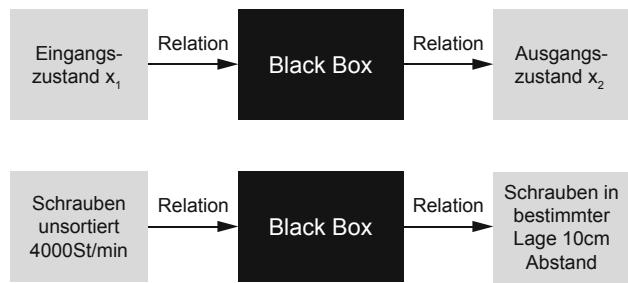
### 4.3.1 Aufgabenspezifische Beschreibung

Wird für eine technische Aufgabe mit Energie-, Stoff- und Signalumsatz eine Lösung gesucht, muss dazu in einem System ein eindeutiger, reproduzierbarer Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang bestehen. Bei einer Stoffumwandlung soll z. B. unter gegebenen Eingangsgrößen stets das gleiche Ergebnis bezüglich der Ausgangsgrößen erzielt werden. Auch soll zwischen dem Beginn und dem Ende eines Vorganges, z. B. dem Füllen eines Speichers, immer ein eindeutiger, reproduzierbarer Zusammenhang gewährleistet sein. Diese Zusammenhänge sind im Sinne einer Aufgabenerfüllung stets gewollt. Zum Beschreiben und Lösen konstruktiver Aufgaben ist folgende Definition für den Begriff „Funktion“ zweckmäßig:

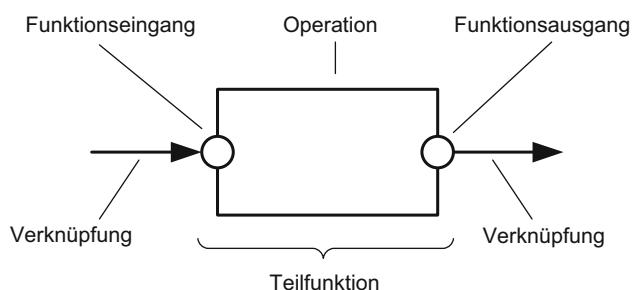
Unter Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen, zu verstehen.

Insbesondere der letzte Punkt der Definition wird in der Praxis häufig übersehen. Das Aufstellen der Funktionsstruktur ist kein Selbstzweck, und es geht schon gar nicht darum, möglichst viele „Kästchen“ zu erzeugen. Das Gegenteil ist der Fall. Die Funktionsstruktur soll das Verständnis für die Aufgabe fördern und Aspekte der Aufgabe deutlich machen. Gleichzeitig zeigt sie erste Lösungsansätze auf.

**Abb. 4.3** Formale Elemente zur Beschreibung einer Funktion (nach Ehrlenspiel 2009)



**Abb. 4.4** Formale Beschreibung einer Funktion, um auch vorhandene Komponenten zu berücksichtigen (nach Kartika 2010)



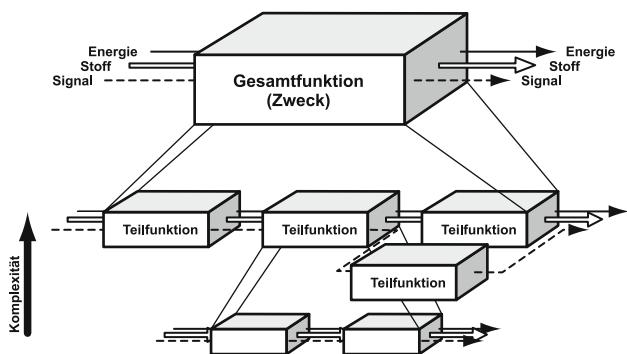
Aufgrund der bisherigen Überlegungen hat Ehrlenspiel drei formale Elemente zur Beschreibung einer Funktion vorgeschlagen (Ehrlenspiel 2009): den Ein- und Ausgangszustand, die Relation und die Operation, s. Abb. 4.3.

Die Relationen in Abb. 4.3 dienen der Verknüpfung der Funktionen untereinander. Hierauf wird in Teil 2 des Buches eingegangen.

Wie in Teil 2 des Buches weiter gezeigt wird, spielt die Funktionsstruktur mit ihren Teilfunktionen bei der Erstellung eines Konzepts eine wichtige Rolle. Bereits in diesem Abschnitt des Buches wurde die Bedeutung der Funktionssicht eines Produkts als Sicht des Kunden im Rahmen der Produktarchitektur behandelt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass in der industriellen Praxis nach Möglichkeit bereits vorhandene Komponenten, also Bauteile oder Baugruppen, zur Erfüllung einer Teilfunktion verwendet werden. So ist die von Ehrlenspiel vorgeschlagene Form der Funktionsbeschreibung, s. Abb. 4.3, insbesondere für diese Fälle nicht eindeutig. Die wieder zu verwendenden Baugruppen haben nicht nur eine vorhandene Funktion, z. B. „Ändern des Drucks“ bei einer Hydraulikpumpe. Für die Aufgabe „Auswahl wiederverwendbarer Baugruppen“ ist neben der zu erfüllenden Funktion und der Art des Flusses zwischen den Teilfunktionen, „Relation“ in Abb. 4.3 (hier hydraulisches Drucköl), auch die Art des Eingangs und Ausgangs der Teilfunktion relevant. Im Beispiel ist es die Anzahl der Hydraulikleitungen. Auch für neue Produkte ist diese Art der Funktionsbeschreibung sinnvoll, um beispielsweise von dem Hauptfluss einen Nebenfluss zum Erzeugen einer Messgröße abzuzweigen.

Kartika (2010) schlägt deshalb die in der Abb. 4.4 dargestellte Funktionsbeschreibung vor.

**Abb. 4.5** Entwicklung einer Funktionsstruktur aus einer Gesamtfunktion



Insbesondere die Einführung des Funktionsein- und -ausgangs ist bedeutend. So können die Funktionen konkreter Komponenten mit ihren Relationen zu anderen Komponenten eindeutig beschrieben werden.

Bei stationären Vorgängen genügt die Bestimmung der Eingangs- und Ausgangsgrößen, bei zeitlich sich verändernden, also instationären Vorgängen, ist darüber hinaus die Aufgabe durch Beschreibung der Größen zu Beginn und Ende auch zeitlich zu definieren. Dabei ist es zunächst nicht wesentlich zu wissen, durch welche Lösung eine solche Funktion erfüllt wird. Die Funktion wird damit zu einer Formulierung der Aufgabe auf einer abstrakten und lösungsneutralen Ebene. Ist die Gesamtaufgabe ausreichend präzisiert, d. h. sind alle beteiligten Größen und ihre bestehenden oder geforderten Eigenschaften bezüglich des Ein- und Ausgangs bekannt, kann auch die Gesamtfunktion angegeben werden.

Eine Gesamtfunktion lässt sich in vielen Fällen sogleich in erkennbare Teilfunktionen aufgliedern, der dann Teilaufgaben innerhalb der Gesamtaufgabe entsprechen. Die Verknüpfung der Teilfunktionen zur Gesamtfunktion unterliegt dabei sehr häufig einer gewissen Zwangsläufigkeit, weil bestimmte Teilfunktionen erst erfüllt sein müssen, bevor andere sinnvoll eingesetzt werden können.

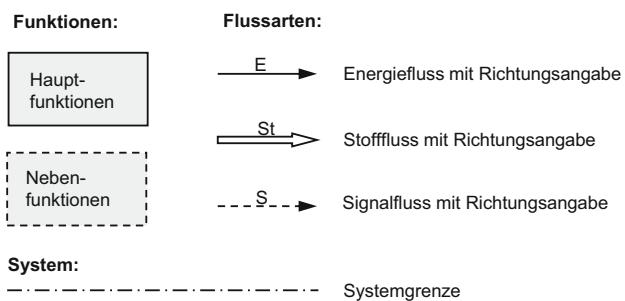
Andererseits besteht auch fast immer eine Variationsmöglichkeit bei der Verknüpfung von Teilfunktionen, wodurch Varianten entstehen. In jedem Fall muss die Verknüpfung der Teilfunktionen untereinander verträglich sein.

Die sinnvolle und verträgliche Verknüpfung von Teilfunktionen zur Gesamtfunktion führt zur sog. Funktionsstruktur, die zur Erfüllung der Gesamtfunktion variabel sein kann.

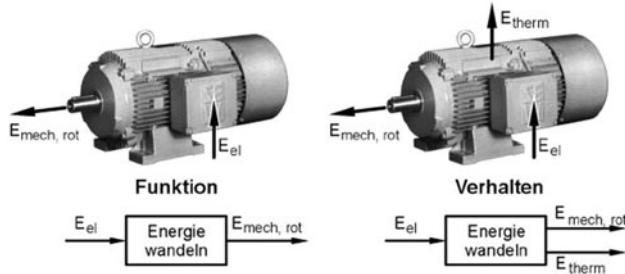
Eine Blockdarstellung in Form von einzelnen Kästen (Schwarzer Kasten, Black-Box, s. Abb. 4.2) vereinfacht das Arbeiten und die Anschaulichkeit. Um die Vorgänge und Teilsysteme innerhalb eines einzelnen Blockes muss sich zunächst nicht gekümmert werden. In Abb. 4.5 ist die beispielhafte Aufteilung einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen wiedergegeben.

Zweckmäßig ist es, zwischen Haupt- und Nebenfunktionen zu unterscheiden. Hauptfunktionen sind solche Teilfunktionen, die unmittelbar der Gesamtfunktion dienen. Nebenfunktionen tragen im Sinne von Hilfsfunktionen nur mittelbar zur Gesamtfunk-

**Abb. 4.6** Symbole zur Darstellung der Fluss- und der Teilfunktionsarten



**Abb. 4.7** Funktion und Verhalten eines Elektromotors (Birkhofer et al. 2000)

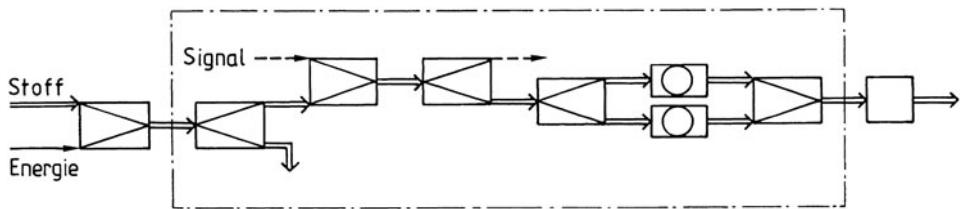


tion bei. Sie haben unterstützenden oder ergänzenden Charakter und sind häufig durch die Art der Lösung bedingt.

Die Definitionen folgen den Vorstellungen der Wertanalyse (DIN EN 1325-1 1996) und sind von der jeweiligen Betrachtungsebene bestimmt. Nicht in allen Fällen sind Haupt- und Nebenfunktionen scharf unterscheidbar, sie nützen aber einer zweckmäßigen Unterteilung und Ansprache. In Abb. 4.6 sind die Symbole zur Darstellung von Teifunktionen in einer Funktionsstruktur wiedergegeben. Hier sind aber die Funktionsein- und -ausgänge nicht dargestellt.

Ihre Einteilung kann durchaus fließend gehandhabt werden. Bei Änderungen der betrachteten Systemgrenzen können Nebenfunktionen zu Hauptfunktionen werden und umgekehrt. Weiterhin ist die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Teifunktionen notwendig. Folgerichtige Abläufe oder zwingende Zuordnungen müssen beachtet werden.

**Verhalten** Neben dem oben behandelten Funktionsbegriff, so wie er zur Erstellung eines Konzepts verwendet wird, ist die Einführung einer weiteren Sichtweise auf Funktionen und damit auf ein Produkt sinnvoll. Birkhofer hat hierfür den Begriff des „Verhaltens“ gewählt (Birkhofer et al. 2000). Neben dem gewollten Verhalten haben Produkte oder Komponenten von ihnen auch Eigenschaften, die für die Funktionserfüllung nicht erforderlich bzw. sogar störend sind. Häufig ist dies die Wärmeentwicklung aufgrund des Wirkungsgrades. In der Praxis erfordert dieses Verhalten des Produkts nicht selten einen nennenswerten Zusatzaufwand. In Abb. 4.7 ist das Beispiel eines Elektromotors wiedergegeben.



**Abb. 4.8** Allgemein anwendbare Funktionen (Nach Krumhauer 1974)

Für diesen sind zum sicheren Betrieb eine Reihe von Zusatzmaßnahmen in Form von Kühlrippen und eines Lüfterrades notwendig. Das Verhalten des Motors hat also zusätzlich Bauraum, Gewicht und Verlustleistung des Lüfters zur Folge.

Häufig ist nach der Erstellung des Konzepts für das Verhalten eines Produkts die Aufstellung der Funktionsstruktur sinnvoll. So kann frühzeitig ein evtl. Zusatzaufwand mit den geschilderten Folgen, wie z. B. zusätzlichen Bauraum, erkannt werden.

### 4.3.2 Allgemein anwendbare Beschreibung

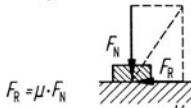
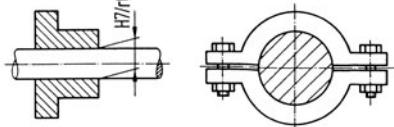
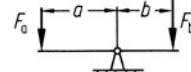
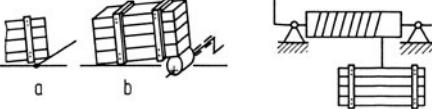
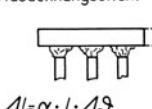
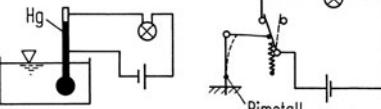
Zunächst muss festgestellt werden, dass es zur symbolischen Darstellung technischer Funktionen keine einheitliche Beschreibungssprache gibt. Es sind allerdings einige Vorschläge verschiedener Autoren vorhanden (Hansen 1966; Hubka 1976; Rodenacker 1991), keine konnte sich aber als allgemeingültig durchsetzen. Dies ist aber vor dem Hintergrund des Zwecks einer Funktionsstruktur nicht entscheidend. Wie oben geschildert, sollte eine Funktion möglichst eindeutig in Form einer Gleichung beschrieben werden. In der Praxis ist dies aber häufig nicht möglich. Dann können die im Teil 2 des Buches aufgeführten Verfahren angewendet werden, insbesondere die „Substantiv und Verb“-Beschreibung. Im Rahmen dieses Werks werden die allgemein anwendbaren Funktionen nach Krumhauer (1974) verwendet, s. Abb. 4.8.

Anwendungsbeispiele zum Aufstellen einer Funktionsstruktur finden sich in Teil 2 dieses Buches.

---

## 4.4 Wirkzusammenhang (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Das Aufstellen einer Funktionsstruktur erleichtert das Finden von Lösungen, da durch die Strukturierung die Bearbeitung weniger komplex wird und die Lösungen für Teilstrukturen zunächst gesondert erarbeitet werden können.

Teilfunktionen	Physikal. Effekte (lösungsneutral)	Wirkprinzipien für eine Teilfunktion ( Phys. Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale )
	Reibungseffekt  $F_R = \mu \cdot F_N$	
	Hebeleffekt  $F_0 \cdot a = F_b \cdot b$	
	Ausdehnungseffekt  $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta \delta$	 Bimetall

**Abb. 4.9** Erfüllen von Teilfunktionen durch Wirkprinzipien, die aus physikalischen Effekten sowie aus geometrischen und stofflichen Merkmalen aufgebaut werden

Die einzelnen Teilfunktionen, die zunächst durch den angenommenen „Schwarzen Kästen“ dargestellt wurden, werden nun durch eine konkretere Aussage ersetzt. Teilfunktionen werden in der Regel durch physikalisches, chemisches oder biologisches Geschehen erfüllt, wobei das erstere in maschinenbaulichen Lösungen überwiegt. Insbesondere bei Lösungen für die Verfahrenstechnik werden solche der Chemie und Biologie genutzt. Wenn fortan von physikalischem Geschehen die Rede ist, so sind damit auch die Möglichkeiten einbezogen, die durch ein chemisches oder biologisches Geschehen nutzbar sind. Dies ist auch insofern gerechtfertigt, als alle Lösungen im Zuge der weiteren Realisierung in irgendeiner Weise vom *physikalischen Geschehen* Gebrauch machen.

Das physikalische Geschehen wird durch das Vorhandensein von *physikalischen Effekten* und durch das Festlegen von *geometrischen und stofflichen Merkmalen* in einen Wirkzusammenhang gebracht, der erzwingt, dass die Funktion im Sinne der Aufgabenstellung erfüllt wird.

Der *Wirkzusammenhang* wird daher von den gewählten physikalischen Effekten und den festgelegten geometrischen und stofflichen Merkmalen bestimmt:

**Physikalische Effekte** Der physikalische Effekt ist durch physikalische Gesetze, die die beteiligten Größen einander zuordnen, auch quantitativ beschreibbar: z. B. der Reibungseffekt durch das Coulombsche Reibungsgesetz  $F_R = \mu \cdot F_N$ , der Hebeleffekt durch das Hebelgesetz  $F_a \cdot a = F_b \cdot b$  oder der Ausdehnungseffekt durch das lineare Ausdehnungsgesetz fester Stoffe  $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta \delta$  (s. Abb. 4.9). Vor allem Rodenacker (1991) und Koller (1994) haben solche Effekte zusammengestellt.

Die Erfüllung einer Teifunktion kann möglicherweise erst durch Verknüpfen mehrerer physikalischer Effekte erzielt werden, z. B. die Wirkungsweise eines Bimetalls, die sich aus dem Effekt der thermischen Ausdehnung und aus dem Hookschen Effekt (Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang) aufbaut.

Eine Teifunktion kann oft von verschiedenen physikalischen Effekten erfüllt werden, z. B. Kraft vergrößern mit dem Hebeleffekt, Keileffekt, dem elektromagnetischen Effekt, dem hydraulischen Effekt usw. Der gewählte physikalische Effekt einer Teifunktion muss aber mit den Effekten von anderen verknüpften Teifunktionen verträglich sein. So kann eine hydraulische Kraftverstärkung nicht ohne Weiteres ihre Energie aus einer elektrischen Batterie beziehen. Es ist ferner einleuchtend, dass ein bestimmter physikalischer Effekt nur unter gewissen Bedingungen die jeweilige Teifunktion optimal erfüllt. Eine pneumatische Steuerung ist z. B. nur unter bestimmten Voraussetzungen einer mechanischen oder elektrischen überlegen.

Verträglichkeit und optimale Erfüllung können in der Regel meist nur im Zusammenhang mit der Gesamtfunktion und erst bei konkreterer Festlegung geometrischer und stofflicher Merkmale sinnvoll beurteilt werden.

**Geometrische und stoffliche Merkmale** Die Stelle, an der das physikalische Geschehen zur Wirkung kommt, kennzeichnet den *Wirkort*. Hier wird die Erfüllung der Funktion bei Anwendung des betreffenden physikalischen Effekts durch die *Wirkgeometrie*, d. h. durch die Anordnung von Wirkflächen (bzw. -linien, -räumen) und durch die Wahl von Wirkbewegungen erzwungen (Miller et al. 1960).

Die Gestalt der *Wirkfläche* wird durch

- Art,
- Form,
- Lage,
- Größe und
- Anzahl

einerseits variiert und andererseits auch festgelegt (Rodenacker 1991).

Nach ähnlichen Gesichtspunkten wird die erforderliche *Wirkbewegung* bestimmt durch

- Art: Translation, Rotation,
- Form: gleichförmig, ungleichförmig,
- Richtung: in x, y, z-Richtung oder/und um x, y, z-Achse,
- Betrag: Höhe der Geschwindigkeit und
- Anzahl: eine, mehrere usw.

Darüber hinaus muss eine erste prinzipielle Vorstellung über die Art des *Werkstoffs* bestehen, mit dem die Wirkflächen realisiert werden sollen, z. B. fest, flüssig oder gasförmig, starr oder nachgiebig, elastisch oder plastisch, hohe Festigkeit und Härte oder hochzäh, verschleißfest oder korrosionsbeständig usw. Eine Vorstellung über die Gestalt genügt oft nicht, sondern

erst die Festlegung *prinzipieller Werkstoffeigenschaften* ermöglicht eine zutreffende Aussage über den *Wirkzusammenhang*.

Nur die Gemeinsamkeit von physikalischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff) lässt das Prinzip der Lösung sichtbar werden. Dieser Zusammenhang wird als *Wirkprinzip* bezeichnet (Hansen 1966 z. B. nennt es Arbeitsweise). Das Wirkprinzip stellt den Lösungsgedanken für eine Funktion auf erster konkreter Stufe dar.

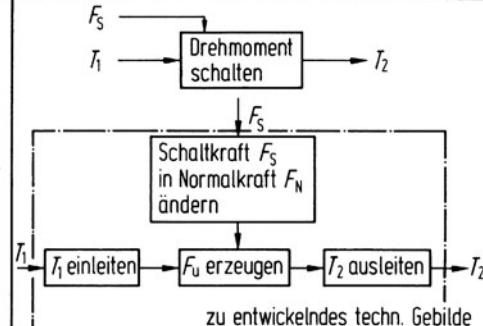
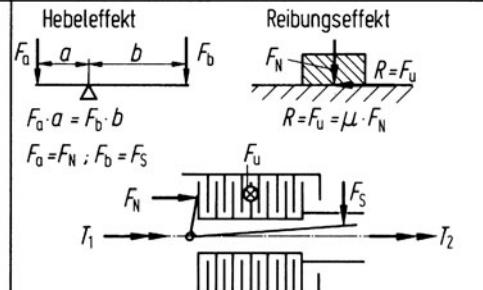
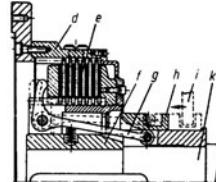
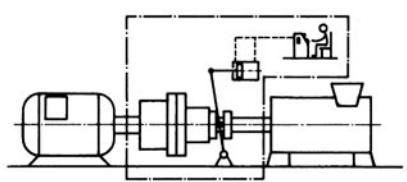
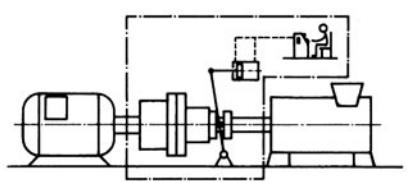
Abbildung 4.9 gibt einige Beispiele:

- Drehmoment übertragen durch Reibungseffekt nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz an einer zylindrischen Wirkfläche führt je nach Art der Aufbringung der Normalkraft zum Schrumpfverband oder zur Klemmverbindung als Wirkprinzip,
- Kraft vergrößern mit Hilfe des Hebeleffekts nach dem Hebelgesetz unter Festlegen des Dreh- und Kraftangriffspunktes (Wirkgeometrie) führt ggf. unter Berücksichtigung der notwendigen Wirkbewegung zur Beschreibung des Wirkprinzips als Hebellösung oder Exzenterlösung usw.,
- elektrischen Kontakt herstellen durch Wegüberbrückung unter Nutzung des Ausdehnungseffekts entsprechend dem linearen Ausdehnungsgesetz führt erst nach Festlegen der notwendigen Wirkflächen hinsichtlich Größe (z. B. Durchmesser und Länge) und Lage zu einer gezielten Wirkbewegung des ausdehnenden Mediums, mit Wahl eines sich um einen bestimmten Betrag ausdehnenden Werkstoffs (Quecksilber) oder eines Bimetallstreifens als Schaltelement, insgesamt zum Wirkprinzip.

Zum Erfüllen der Gesamtfunktion werden die Wirkprinzipien der Teilfunktionen zu einer Kombination verknüpft. Hier sind selbstverständlich auch mehrere unterschiedliche Kombinationen möglich. Die Richtlinie VDI 2222 bezeichnet diese Kombination als Prinzipkombination (VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1 1977).

Die Kombination mehrerer Wirkprinzipien führt zur *Wirkstruktur* einer Lösung. In einer Wirkstruktur wird das Zusammenwirken mehrerer Wirkprinzipien erkennbar, die das Prinzip der Lösung (Lösungsprinzip) zum Erfüllen der Gesamtaufgabe angibt. Kennzeichnend ist, dass die Wirkstruktur ausgehend von der Funktionsstruktur die gewollte Wirkungsweise, also die Zweckwirkung und die zugehörigen Abläufe auf prinzipieller Ebene erkennen lässt. Hubka bezeichnet in Hubka (1984); Hubka und Eder (1988, 1992); die Wirkstruktur als Organstruktur.

Zur Darstellung genügt bei bekannten Elementen ein Schaltplan oder ein Flussbild. Mechanische Gebilde werden zweckmäßig als Strichbild wiedergegeben und nicht allgemein festgelegte Elemente erfordern oftmals eine erläuternde Skizze (s. Abb. 4.9 und 4.10). Vielfach ist die alleinige Wirkstruktur aber noch zu wenig konkret, um das Prinzip der Lösung beurteilen zu können. Die Wirkstruktur muss z. B. durch eine überschlägige Rechnung oder eine grobmaßstäbliche Untersuchung der Geometrie quantifiziert werden. Erst dann kann das Lösungsprinzip festgelegt werden. Das Ergebnis wird dann als prinzipielle Lösung bezeichnet.

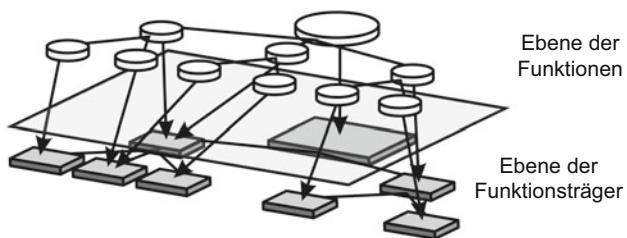
Zusammenhänge	Elemente	Struktur	Beispiel
Funktions-zusammenhang	Funktionen	Funktions-struktur	 <p>zu entwickelndes techn. Gebilde</p>
Wirk-zusammenhang	Physikalische Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale ↓ Wirkprinzipien	Wirk-struktur	 <p>Hebeleffekt: <math>F_a \cdot a = F_b \cdot b</math>, <math>F_a = F_N ; F_b = F_S</math></p> <p>Reibungseffekt: <math>R = F_u = \mu \cdot F_N</math></p> 
Bau-zusammenhang	Bauteile Verbindungen Baugruppen	Bau-struktur	
System-zusammenhang	Techn. Gebilde Mensch Umgebung	System-struktur	

**Abb. 4.10** Zusammenhänge in technischen Systemen

Durch den Wirkzusammenhang werden die vom Produkt zu erfüllenden Funktionen entsprechend der Funktionsstruktur und die sie jeweils realisierenden Funktionsträger festgelegt, s. Abb. 4.11.

Die Funktionsträger werden in diesem Zusammenhang im Wesentlichen durch den jeweils genutzten physikalischen Effekt repräsentiert.

**Abb. 4.11** Zusammenhang zwischen Funktionen eines Produkts und den sie realisierenden Funktionsträgern



Der in Abb. 4.11 dargestellte Zusammenhang zwischen Funktionen und den Funktionsträgern wird in diesem ersten Schritt im Wesentlichen aus Sicht der Entwicklung festgelegt. Eine erste Produktgliederung, z. B. in Baugruppen kann evtl. bereits erahnt werden, ergibt sich aber nicht zwangsläufig. Diese bewusste Festlegung, welche Funktion durch welchen Funktionsträger und damit letztlich Bauteil oder Baugruppe realisiert werden, erfolgt mit Hilfe der Produktarchitektur.

Zu beachten ist ebenfalls der Zusammenhang des betrachteten Systems mit seinem Umfeld.

#### 4.4.1 Bauzusammenhang

Der in der Wirkstruktur bzw. in der prinzipiellen Lösung erkennbare Wirkzusammenhang ist Grundlage bei der weiteren Konkretisierung, die zur *Baustruktur* führt. In diesem Zusammenhang entstehen dann die Bauteile, Baugruppen oder Maschinen mit ihren zugehörigen Verbindungen, die das konkrete technische Gebilde bzw. System schließlich darstellen. Die Baustruktur berücksichtigt die Notwendigkeiten der Fertigung, der Montage, des Transports etc. Abb. 4.10 zeigt am Beispiel der in Abb. 4.1 dargestellten Schaltkupplung die vorgenannten grundlegenden Zusammenhänge, die in ihrer Reihung gleichzeitig Konkretisierungsstufen darstellen.

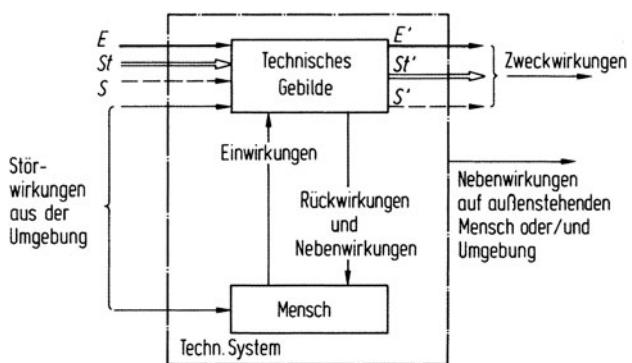
Die realen Elemente einer Baustruktur genügen sowohl der gewählten Wirkstruktur als auch allen anderen Anforderungen, denen das gesamte System entsprechen muss. Um diese vollständig und rechtzeitig zu erkennen, sind aber noch systemtechnische Zusammenhänge zu beachten.

#### 4.4.2 Systemzusammenhang

Technische Gebilde bzw. technische Systeme stehen nicht allein, sie sind im Allgemeinen Bestandteil eines übergeordneten Systems. In einem solchen System wirkt vielfach der Mensch mit, indem er das technische System im Sinne der Funktionserfüllung durch *Einwirkungen* (handelnd, korrigierend, überwachend) beeinflusst. Dabei erfährt er *Rückwirkungen*, auch Rückmeldungen, die ihn zu weiterem Handeln veranlassen (s. Abb. 4.12). Er unterstützt oder ermöglicht damit die gewollten *Zweckwirkungen* des technischen Systems.

Daneben können nichtgewollte Eingänge auf das technische System aus der Umgebung (auch Nachbarsysteme), also *Störwirkungen* (z. B. zu hohe Temperatur), auftreten, die

**Abb. 4.12** Zusammenhänge in technischen Systemen unter Beteiligung des Menschen



nichtgewollte *Nebenwirkungen* erzeugen (z. B. Formabweichung, Verlagerungen). Ferner können aus dem Wirkzusammenhang (Zweckwirkungen) ebenfalls ungewollte Erscheinungen als Nebenwirkungen (z. B. Schwingungen) sowohl aus den einzelnen technischen Gebilden innerhalb des Systems als auch aus dem Gesamtsystem nach außen auftreten, die den Menschen oder die Umgebung erreichen.

Gemäß Abb. 4.12 ist nach VDI-Richtlinie 2242 Blatt 1 (1986) zweckmäßig wie folgt zu unterscheiden:

- Zweckwirkung: funktionale (gewollte) Wirkung als gewünschtes Ergebnis im Sinne der Nutzung
- Einwirkung: funktionale Beziehung als Handlung des Menschen im technischen System
- Rückwirkung: funktionale Beziehung des technischen Gebildes auf den Menschen oder auf ein anderes technisches Gebilde
- Störwirkung: funktional nicht gewollte (unerwünschte) Einflüsse von außen auf das technische System, technische Gebilde oder den Menschen, die die Funktionserfüllung beeinträchtigen oder erschweren
- Nebenwirkung: funktional unerwünschte und unbeabsichtigte Wirkung des technischen Gebildes bzw. Systems auf den Menschen und auf die Umgebung

Alle Wirkungen müssen im Gesamtzusammenhang bei der Entwicklung technischer Systeme verfolgt werden. Um diese rechtzeitig zu erkennen, sie zu nutzen oder ihnen nötigenfalls zu begegnen, ist es zweckmäßig, eine methodische Leitlinie zu benutzen, die generelle Zielsetzungen und Bedingungen berücksichtigt.

## 4.5 Produktarchitektur (Jan Göpfert, Gerhard Tretow)

Zahlreiche empirische Studien belegen, dass ca. 70–80 % der Kosten eines Produktes in der Entwicklungsphase festgelegt werden.<sup>1</sup> In dieser Phase wird die Produktarchitektur definiert, die maßgeblich den späteren wirtschaftlichen Erfolg oder Misserfolg eines Produktes

<sup>1</sup>Ehrlenspiel et al. (2007), S. 13–14.

beeinflusst. Die Gestaltung der Produktarchitektur besitzt einen so hohen Stellenwert, weil hiermit Produktfunktionen und zentrale Produkteigenschaften, die Modulstruktur sowie die künftige Varianz des Produktes festgelegt werden. Diese Entscheidungen haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Kosten und die Effizienz der Abwicklung aller nachfolgenden Stufen der Wertschöpfungskette. Die richtige Produktarchitektur ermöglicht die Wiederverwendung von Komponenten, reduziert die Variantenvielfalt, senkt Montagekosten und führt zu effizienten Lieferantenstrukturen. Sie erhöht damit die Profitabilität, bringt Wettbewerbsvorteile und reduziert die immer bedeutsamere „Time-to-Market“<sup>2</sup>-Zeitspanne.

Der kritische Blick auf die Produktarchitektur ist insbesondere in der Phase des Wachstums erforderlich, die oft eine ungebremste Zunahme der Produktkomplexität und damit eine überproportionale Steigerung der Kosten mit sich bringt. Doch auch wenn die Kosten senkung im Vordergrund steht, beispielsweise weil neue Märkte erschlossen werden sollen oder Wettbewerbsprodukte die eigene Marktposition bedrohen, ist oftmals die radikale Vereinfachung der Produktarchitektur die einzige sinnvolle Lösung.

#### Ein Beispiel aus der Schienenfahrzeugindustrie

Durch die Einführung einer modularen Architektur einer Straßenbahn konnte der durchschnittliche projektspezifische Entwicklungsaufwand je Auftrag um 73 % gesenkt werden. Zentraler Hebel war dabei die Wiederverwendung von bereits entwickelten Modulen und die Reduzierung überzogener, „historisch gewachsener“ Anforderungen. Durch die Modularisierung und präzise definierte Schnittstellen wurde es möglich, sehr viel größere Umfänge an Systemlieferanten zu vergeben. Dies reduzierte die Zahl der Lieferanten auf knapp die Hälfte, was wiederum zu effizienteren Beschaffungs- und Logistikprozessen führte. Die reduzierte Varianz führte über Stückzahleffekte zu einer Reduzierung der Materialkosten von über 18 %. Zugleich wurde der Montageaufwand durch die Modul-Montage um 63 % reduziert. Darüber hinaus konnte die Inbetriebsetzung von 20 auf 4 Tage verkürzt werden, da durch die Wiederverwendung standardisierter, getester Module auch Fehlerquellen und anzuwendende Testverfahren minimiert wurden. Neben den dargestellten erheblichen Kosteneinsparungen verkürzte sich die Durchlaufzeit (d. h. die Zeit von Bestellung bis Auslieferung) um mehr als 30 %.

Die Produktarchitektur betrachtet also nicht nur ein einzelnes Produkt, wie das vorangegangene Beispiel zeigt. Um den vielfältigen Kundenanforderungen und Marktbedürfnissen gerecht zu werden, erstreckt sich die Perspektive auf alle Varianten des Produktes oder sogar auf das gesamte Produktangebot eines Unternehmens.

Auf einen Nenner gebracht besteht die zentrale Herausforderung darin, dem Kunden stark individualisierte Produkte schnell und zu günstigen Preisen anbieten zu können. Kunden möchten „ihr Produkt“ auswählen können, das den individuellen Wünschen und

<sup>2</sup>Die „Time-to-market“ ist definiert als die Zeitspanne zwischen Beginn der Entwicklung eines Produktes bis zur ersten Auslieferung an den Kunden.

Anforderungen perfekt entspricht. Im Idealfall kann der Kunde sein Produkt in gewissen Grenzen sogar selbst gestalten und konfigurieren, wie dies z. B. heute beim Auto- oder Computerkauf der Fall ist.

Die Forderung nach individuellen Produkten allein ist für ein Unternehmen prinzipiell kein Problem. Nötigenfalls wird das Produkt nach Kundenwunsch in Einzelfertigung hergestellt. Allerdings – und hier beginnt das eigentliche Problem – ist der Kunde in den meisten Fällen nicht bereit, die mit der Produktvielfalt und Individualisierung verbundenen zusätzlichen Kosten zu tragen. Oder mit anderen Worten: Von den Kunden erwartet werden heute individualisierte Produkte zum Preis von Standardprodukten!<sup>3</sup>

Zusammenfassend lassen sich folgende Zielsetzungen der Produktarchitekturgestaltung nennen:

1. Technische und ökonomische Gestaltungsziele
  - Kostengünstige Realisierung der Anforderungen an Produktfunktionen und Eigenschaften,
  - geringe Entwicklungszeit und -kosten durch Wiederverwendung derselben Komponenten, Prozesse, Technologien, Wissen und Personen,
  - geringe Einkaufspreise durch höhere Stückzahlen von Komponenten und Modulen („economies of scale“),
  - einfache Herstellung/Montierbarkeit des Produktes und
  - geringer Aufwand in Materialeinkauf, Logistik, Vertrieb und After-Sales-Service durch geringe Zahl von Komponenten und Baugruppen.
2. Variantenorientierte Gestaltungsziele
  - Abdeckung der Anforderungen mehrerer Marktsegmente durch Variation derselben Produktarchitektur,
  - Ermöglichung einer hohen Zahl und schnellen Folge von Produktvarianten bei geringem Änderungsaufwand und
  - flexible Reaktionsmöglichkeit auf kurzfristige Marktveränderungen oder technologische Entwicklungen.
3. Organisatorische Gestaltungsziele
  - Eindeutige Abgrenzung von Aufgabenumfängen, so dass diese einfach an interne Organisationseinheiten oder externe Lieferanten übergeben werden können.

Die Gestaltung der Produktarchitektur wird damit zu einem zentralen Erfolgsfaktor eines Unternehmens. Dabei ist eine Vielzahl von Einflüssen zu berücksichtigen, die weit über die rein technische Perspektive hinausgehen. Vielmehr sind die zum Teil widersprüchlichen Anforderungen der unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen von der Entwicklung bis zum Vertrieb und After-Sales zu einem Gesamtoptimum zusammenzuführen.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Grundlagen der Produktarchitektur beschrieben und der Begriff definiert. Die Besonderheiten modularer und integraler Pro-

<sup>3</sup>vgl. Pine (1993), S. 8.

duktarchitekturen stehen im darauf folgenden Abschnitt im Vordergrund. Abschließend wird auf die Gestaltung und Optimierung von Produktarchitekturen eingegangen.

## 4.5.1 Grundlagen der Produktarchitektur

### 4.5.1.1 Die Basis: Funktions- und Produktstruktur

In der Entwicklung wird ein Produkt mindestens aus zwei Perspektiven betrachtet: funktional und physisch. Während die Funktionsstruktur das Produkt funktional beschreibt, liefert die Produktstruktur<sup>4</sup> dessen physische Beschreibung. Diese physische Beschreibung stellt die Zusammensetzung der Komponenten des Produktes zu größeren Baugruppen dar, die ihrerseits zum Gesamtprodukt kombiniert werden. Somit beschreibt die Produktstruktur *eine* mögliche Lösung zur physischen Realisierung der geforderten Produktfunktionen unter Anwendung ausgewählter Lösungsprinzipien. Je nachdem welche Wirkprinzipien zur Anwendung kommen, ergeben sich bei gleicher Funktionalität in der Regel auch andere Realisierungsmöglichkeiten und damit Produktstrukturen. Die optimale Lösung ist im Rahmen des Entwicklungsprozesses zu identifizieren. Letztlich stellt die Transformation einer abstrakten Funktionsstruktur in eine konkrete Produktstruktur die Kernaufgabe der Produktarchitekturgestaltung und der darauffolgenden Detailentwicklung dar.<sup>5</sup>

Ebenso wie die Funktionsstruktur lässt sich die Produktstruktur in einer Hierarchie darstellen, an deren Spitze das *Produkt* steht, welches auf den niedrigeren Hierarchieebenen schrittweise in *Baugruppen* und schließlich elementare *Komponenten* zerlegt oder „dekomponiert“ wird (s. Abb. 4.13).

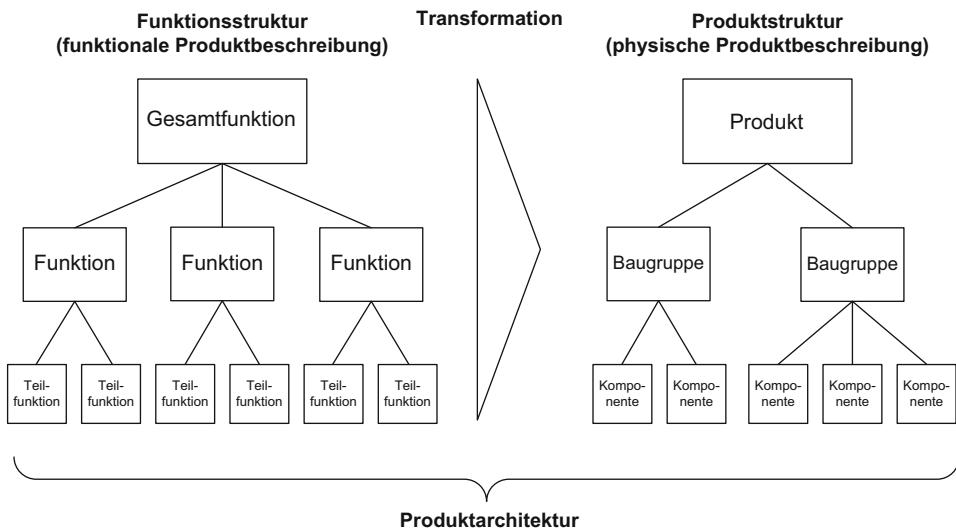
### 4.5.1.2 Definition der Produktarchitektur

Durch die Dekomposition der funktionalen sowie der physischen Beschreibung eines Produktes entstehen also zwei Strukturen, die das Produkt aus unterschiedlicher Perspektive definieren. Die *Funktionsstruktur* zeigt im Detail auf, welche Funktionen das Produkt erbringen soll. Die *Produktstruktur* dagegen gibt an, durch welchen technisch-physischen Zusammenbau diese Funktionen erfüllt werden. Beide Strukturen werden in der *Produktarchitektur* miteinander verknüpft bzw. ineinander überführt, so dass diese durch die folgenden drei Bestandteile definiert ist:

1. die *Funktionsstruktur* des Produktes, d. h. die Dekomposition der geforderten Funktion in Teilfunktionen und deren Beziehungen
2. die *Produktstruktur* des Produktes, d. h. die physische Zusammensetzung der Komponenten eines Produktes

<sup>4</sup>Anstelle von Produktstruktur wird in den Ingenieurwissenschaften auch oft von Baustruktur oder Erzeugnisgliederung gesprochen, vgl. Pahl und Beitz (1993), S. 474. Im Folgenden wird durchgängig der Begriff „Produktstruktur“ verwendet.

<sup>5</sup>Vgl. Göpfert (1998), S. 73 ff.



**Abb. 4.13** Produktentwicklung als Transformation einer Funktionsstruktur in eine Produktstruktur

3. die *Transformation* zwischen Funktions- und Produktstruktur, d. h. der Zusammenhang zwischen funktionaler und physischer Beschreibung des Produktes.<sup>6</sup>

Die Produktarchitektur wird definiert durch die Funktionsstruktur, die Produktstruktur sowie die Transformationsbeziehung zwischen diesen beiden Strukturen.<sup>7</sup>

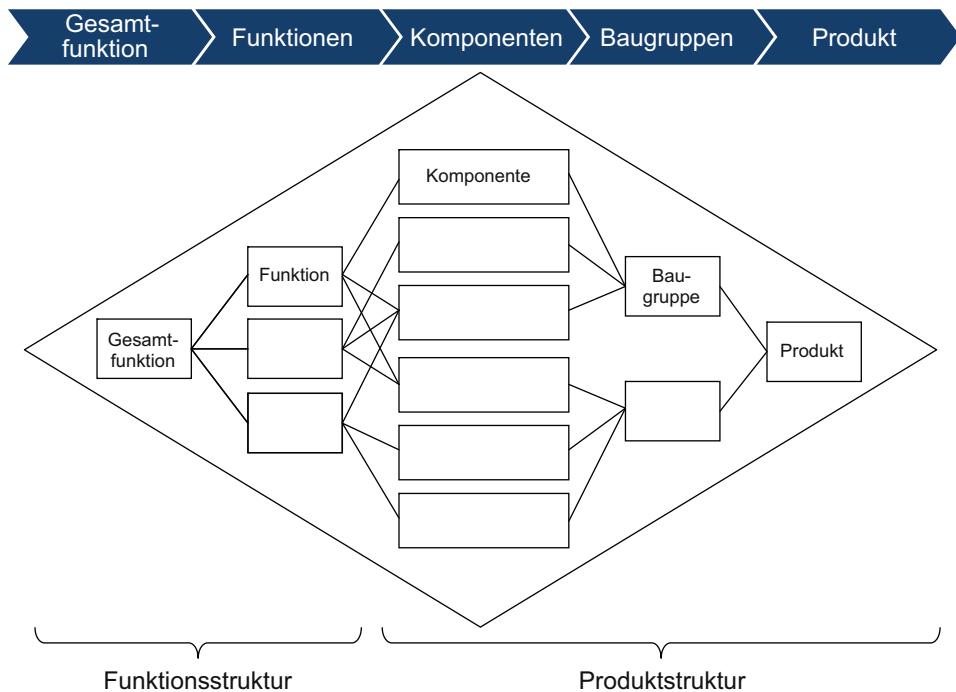
Die Zusammenführung von Funktions- und Produktstruktur zur Produktarchitektur lässt sich in der in Abb. 4.14 dargestellten „METUS-Raute“ übersichtlich visualisieren.

#### 4.5.1.3 Schnittstellen und Beziehungen

Aus der Verknüpfung von Funktions- und Produktstruktur in Abb. 4.14 wird deutlich, dass Komponenten mehrere Funktionen zugleich erfüllen können. Umgekehrt werden Funktionen zum Teil von mehreren Komponenten erfüllt. Aus diesen Mehrfachzuordnungen ergeben sich *funktionale Beziehungen* zwischen Komponenten, wenn mehrere Komponenten gemeinsam der Erfüllung einer Funktion dienen. Innerhalb der Produktstruktur

<sup>6</sup>Vgl. für eine annähernd deckungsgleiche Definition Ulrich (1995), S. 420.

<sup>7</sup>Vgl. Ulrich (1995), S. 420.



**Abb. 4.14** Darstellung einer Produktarchitektur als Zusammenführung von Funktions- und Produktstruktur („METUS-Raute“)

existieren dagegen nur eindeutige Beziehungen: Eine bestimmte Komponente kann jeweils nur einer Baugruppe zugeordnet sein.<sup>8</sup>

Zwischen den Komponenten eines Produktes bestehen weiterhin teilweise *physische Beziehungen*, die als *Schnittstellen* bezeichnet werden.<sup>9</sup> Über Schnittstellen werden in der Regel Energie, Information oder Materie übertragen. Oftmals ist an dieser Übertragung noch ein Medium beteiligt, wie z. B. ein physikalischer Kontakt, ein elektrisches Kabel, eine Schraube oder eine Flüssigkeitsleitung.<sup>10</sup> Bei genügend hohem Detaillierungsgrad erscheinen diese Medien als physische Komponenten auch in der Produktstruktur.

Neben den physisch existenten Schnittstellen, die Energie, Materie oder Informationen zwischen Komponenten übertragen, sind auch *abstrakte Beziehungen* von Bedeutung. Diese abstrakten Beziehungen ergeben sich aus der physischen Präsenz des Produktes im Raum.

<sup>8</sup>Der Grund liegt in der montageorientierten Sichtweise: Eine bestimmte Komponente wird nur genau einmal verbaut. Sofern die gleiche Komponente (z. B. ein bestimmter Schraubentyp) mehrfach verwendet wird, so wird diese Komponente in der Produktstruktur auch mehrfach aufgeführt, so dass sich wieder eine eindeutige Struktur ergibt.

<sup>9</sup>vgl. Ulrich (1995), S. 421f.

<sup>10</sup>Vgl. Grady (1993), S. 271.

So kann die räumliche Nähe zwischen zwei Komponenten eine wichtige Beziehung darstellen, beispielsweise wenn beide um den gleichen Bauraum „konkurrieren“ oder sich durch die räumliche Nähe weitere Beziehungen wie z. B. Wärmeübertragung ergeben. Ebenfalls den abstrakten Beziehungen zuzuordnen sind gestalterisch-ästhetische Beziehungen zwischen Komponenten, die Form und Aussehen des Produktes bestimmen.

## 4.5.2 Modulare und integrale Produktarchitekturen

### 4.5.2.1 Module und Modularität

Durch die Zusammenführung von funktionaler und physischer Sichtweise wird es möglich, ein Modul zu definieren:

Ein Modul stellt eine funktional und physisch relativ unabhängige Einheit dar.

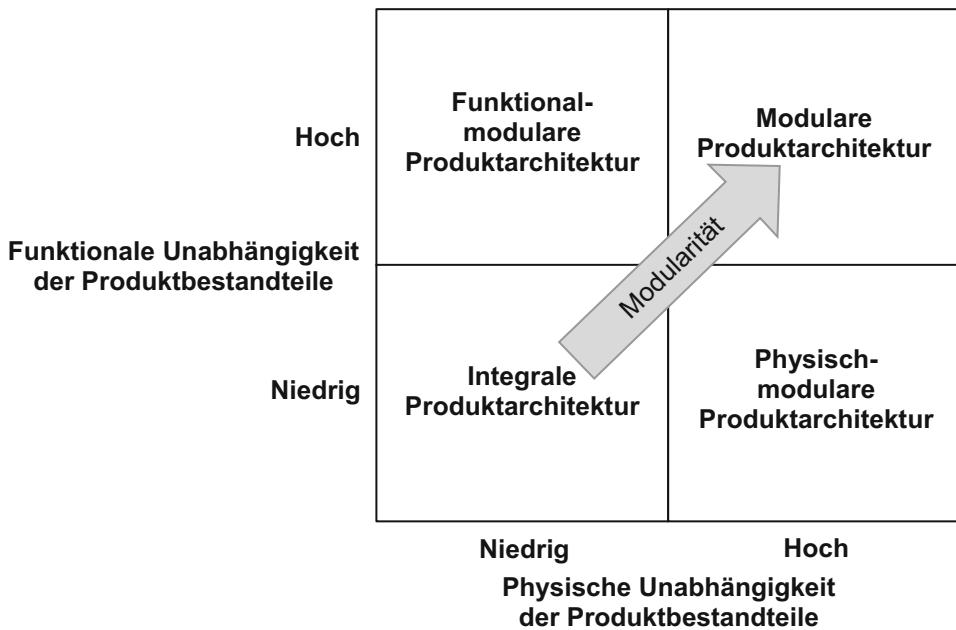
Die funktionale Unabhängigkeit ist dann gegeben, wenn ein Modul eine bestimmte Funktion oder mehrere Funktionen unabhängig von anderen Modulen erfüllt. Die funktionale Unabhängigkeit von Modulen ist somit in hohem Maße von der funktionalen Abhängigkeit der zugeordneten Komponenten bestimmt. Die physische Unabhängigkeit liegt vor, wenn das Modul sich durch eine entsprechende Schnittstellengestaltung von anderen Modulen physisch trennen lässt. Je höher die Unabhängigkeit eines Moduls hinsichtlich beider Dimensionen ausgeprägt ist, desto größer ist das Maß der Modularität. So stellt z. B. der aufsteckbare Blitz einer Kamera ein Modul dar, da einerseits die Funktionserfüllung relativ unabhängig von den Modulen Objektiv und Gehäuse erfolgt und andererseits über die Schnittstelle auch eine physische Separierbarkeit gegeben ist.

Da eine vollständige funktionale und physische Unabhängigkeit nur selten erreicht wird, stellt die Modularität eine graduelle Eigenschaft dar – es gibt also mehr oder weniger modulare Einheiten innerhalb einer Produktarchitektur. Somit muss ein Modul auch nicht zwangsläufig eine Funktion komplett erfüllen oder eine vollständige maschinenbaulich sinnvolle Einheit darstellen, es sinkt lediglich der Grad an Modularität.

### 4.5.2.2 Modulare Produktarchitekturen

Anhand der Dimensionen „funktionale Unabhängigkeit“ und „physische Unabhängigkeit“ lassen sich auf einer aggregierten Ebene verschiedene Typen von Produktarchitekturen klassifizieren (s. Abb. 4.15).

Eine modulare Produktarchitektur lässt sich damit wie folgt definieren:



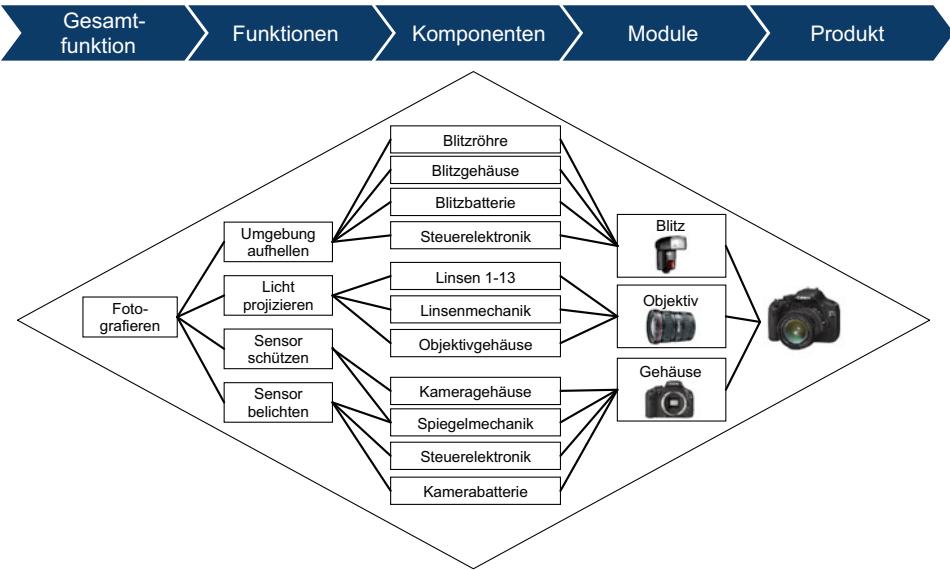
**Abb. 4.15** Produktarchitekturen – eine Typologie

Eine *modulare Produktarchitektur* besteht aus *funktional und physisch* relativ unabhängigen, abgeschlossenen Einheiten (Modulen).

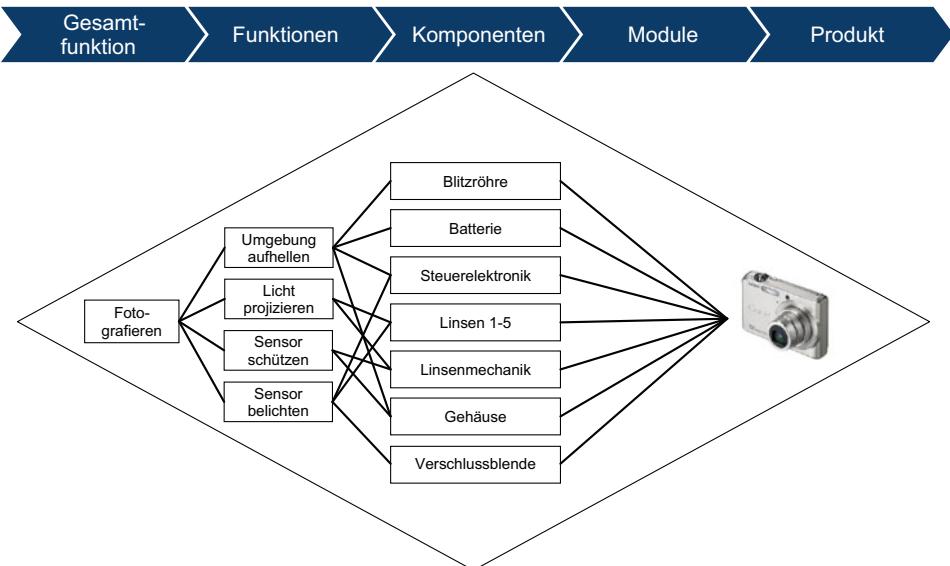
Damit unterscheidet sie sich insbesondere von der *integralen Produktarchitektur*, bei der die Bestandteile eines Produkts sowohl physisch als auch funktional hohe Abhängigkeiten aufweisen.<sup>11</sup> Beispiel einer modularen Produktarchitektur ist eine Spiegelreflexkamera, bei der Kameragehäuse, Objektiv und Blitzlicht jeweils funktional und physisch relativ unabhängige Einheiten darstellen: Zum einen erfüllt jedes dieser Module bestimmte Funktionen des Produkts unabhängig von anderen Modulen und deren Komponenten, zum anderen sind diese Module physisch voneinander trennbar. Dagegen liegt der klassischen Sucherkamera eine integrale Produktarchitektur zugrunde. Hier findet keine Modulbildung statt, da die Komponenten funktional stark voneinander abhängen und zudem im Produkt physisch untrennbar miteinander verbunden werden. So ist das Objektiv beispielsweise zugleich Teil des Kameragehäuses. Beide Architekturen sind in Abb. 4.16 gegenübergestellt.

<sup>11</sup>Auf die Mischformen „funktional-modulare“ und „physisch-modulare“ Produktarchitektur kann hier aus Platzgründen nicht eingegangen werden. Siehe dazu detailliert Göpfert (1998), S. 107–111.

Modulare Produktarchitektur (Beispiel Spiegelreflexkamera):



Integrale Produktarchitektur (Beispiel Sucherkamera):



**Abb. 4.16** Modular vs. integrale Produktarchitektur. (Quelle: Freigestellte Produktfotos Canon Deutschland GmbH)

#### 4.5.2.3 Effekte der modularen Produktarchitektur

Modulare Produktarchitekturen besitzen gegenüber integralen Produktarchitekturen eine Reihe von *Vorteilen* – in der Entwicklung, der Produktion sowie der späteren Nutzung des Produktes. Insbesondere lässt sich durch die Modularisierung die Komplexität des Entwicklungsprozesses wirkungsvoll reduzieren: Die *Entkopplung* der Module bewirkt, dass sich die Gesamtkomplexität des Produktes auf die verschiedenen Module des Produktes verteilt, die jeweils relativ unabhängig voneinander entwickelt werden können. Die Beziehungen der Module beschränken sich dabei auf wenige, eindeutig definierbare Schnittstellen (etwa den Bajonettverschluss zwischen Kameragehäuse und Objektiv). Durch die funktionale und physische Abgeschlossenheit wird auch eine separate *Prüfung* einzelner Module ermöglicht. Der Entwicklungsprozess kann darüber hinaus noch weiter vereinfacht werden, wenn sich bereits entwickelte Module *wiederverwenden* lassen. Weiterhin lassen sich modulare Produktarchitekturen durch den *Austausch* einzelner Module auf einfache Weise modifizieren bzw. durch Hinzufügen neuer Module einfach *erweitern*. Neue Produkte entstehen dann lediglich durch die *Kombination* bestehender Module nach dem Baukastenprinzip.

Die Vorteile der Modularisierung lassen sich insbesondere dann erschließen, wenn die verschiedenen Module und ihre Schnittstellen *standardisiert*, also unternehmensintern oder gar unternehmensübergreifend vereinheitlicht, werden. Durch die Wiederverwendung standardisierter Komponenten wird die Zahl der zu entwickelnden Komponenten deutlich verringert. Durch unternehmensübergreifend gültige Standards bietet sich zudem für Fremdhersteller die Möglichkeit, Module anzubieten. So haben sich am Markt beispielsweise Fremdhersteller etabliert, die sich auf die Entwicklung von Objektiven für bestehende Kamerafabrikate spezialisiert haben.

Allerdings bringt die Modularisierung auch potenzielle *Nachteile*: Da die Module jeweils eigenständige, möglichst wiederverwendbare Einheiten darstellen, fallen modulare Produkte oft größer und schwerer aus als integrale Produkte, bei denen die Komponenten produktspezifisch optimiert und aufeinander abgestimmt werden können. Durch die Verwendung derselben Module in verschiedenen Produkten ergeben sich zudem weniger Möglichkeiten zur Produktdifferenzierung, möglicherweise fehlt es gar an „*Produktintegrität*“, dem optimalen Zusammenspiel der Komponenten.<sup>12</sup>

Das größte Risiko der Modularisierung besteht dann, wenn sich im Nutzungsfall zeigt, dass nicht reife oder nicht funktionsfähige Technologien in einem Modul verwendet wurden. Bei einem hohen Wiederverwendungsgrad von Modulen hat dies Auswirkungen auf eine Vielzahl von Produkten. Das technische Risiko von Lösungen in vielfach verwendeten Produkten ist demgemäß sehr sorgfältig zu bewerten.

Tabelle 4.1 fasst die genannten Effekte der Modularisierung zusammen.

Die Entscheidung für eine bestimmte Form der Produktarchitektur stellt also für jedes Unternehmen eine fundamentale Weichenstellung dar, die weitreichende Konsequenzen für

<sup>12</sup>Vgl. Clark und Fujimoto (1990).

**Tab. 4.1** Effekte der Modularisierung

Effekte der Modularisierung	Vorteile in der Entwicklung	Vorteile in der Produktion	Vorteile in der Nutzung	Nachteile
Entkopplung	Wenige, klar definierte Schnittstellen Parallelisierung der Entwicklung	Geringerer Montageaufwand durch weniger Baugruppen und Schnittstellen	Montage und Demontage durch den Nutzer möglich	Aufwändige Konstruktion, Spezifikation und Realisierung der Schnittstellen
Wiederverwendung	Geringerer Entwicklungsaufwand durch Verwendung bereits entwickelter Module	Kostensenkung und geringere Fehlerrate durch Skalen- und Lernkurveneffekte	Weiterverwendung einzelner Module in anderen Produkten	Geringse Produktendifferenzierung Risiko von Fehlern
Austauschbarkeit	Einfache Veränderung der Produktarchitektur durch Austausch einzelner Module	Vereinfachter Austausch von fehlerhaften Modulen in der Produktion	Vereinfachte Reparatur des Produktes durch Austausch defekter Module	Beschränkung der Reparaturmöglichkeiten auf Modulaustausch
Erweiterbarkeit	Erweiterung der Produktfunktionalität durch Hinzufügen von Modulen	Produkterweiterung erfordert keine produktstechnische Veränderung	Nachträgliche Produkterweiterung möglich	Fehlende Produktintegrität
Standardisierbarkeit	Verwendung existierender Lösungen durch Vereinheitlichung von Modulen und Schnittstellen	Reduzierung der Komponentenvielfalt Verwendung marktverfügbarer Komponenten	Bessere Verfügbarkeit und günstigere Preise durch konkurrierende Anbieter	Geringe Differenzierung Substituierbarkeit von Modulen suboptimale Produktleistung
Prüfbarkeit	Vereinfachter Funktions test im Entwicklungsprozess	Fehlerreduzierung durch Prüfung der Module vor dem Einbau	Vereinfachte Identifikation defekter Module	Einzelprüfung von Modulen garantiert nicht Funktion des Gesamtproduktes
Kombinierbarkeit	Kombination von Modulen im Baukastenprinzip	Einfache Herstellung von Produktvarianten und Produktfamilien	Individuelle Zusammenstellung und Gestaltung des Produktes	Erstellung und Pflege von Baukästen ist aufwändig

das Produkt, seinen Entwicklungsprozess, die spätere Herstellung, Nutzung und schließlich auch Entsorgung hat.

#### 4.5.2.4 Integrale Produktarchitekturen

Die zuvor diskutierten potenziellen Nachteile modularer Produktarchitekturen machen deutlich, dass die Modularisierung durchaus ihre Grenzen hat. In Abhängigkeit von der mit dem Produkt verfolgten Zielsetzung sind daher in manchen Fällen integrale Produktarchitekturen vorzuziehen. Deren Vorteile liegen insbesondere dort, wo modulare Architekturen Schwächen aufweisen und umgekehrt.

Integrale Produktarchitekturen zeichnen sich durch eine hohe *funktionale* und *physische* Abhängigkeit ihrer Komponenten aus.

Diese Abhängigkeiten ergeben sich primär daraus, dass in einer integralen Produktarchitektur Komponenten genutzt werden, um *mehrere* (Teil-)Funktionen gleichzeitig zu erfüllen. Diese mehrdeutige Zuordnung zwischen physischen Komponenten und Teifunktionen wird auch als „function sharing“ bezeichnet.<sup>13</sup>

Function sharing basiert oft auf der Ausnutzung sekundärer Eigenschaften von Komponenten. Beispielsweise wird das Motorgehäuse bei Motorrädern gleichzeitig als Anlenkpunkt für Fahrwerkskomponenten wie die Hinterradschwinge genutzt. Ein wesentlicher Vorteil einer solchen funktionalen Mehrfachnutzung von Komponenten liegt darin, dass dadurch in der Regel weniger Komponenten erforderlich sind und somit eine vereinfachte Fertigung und Endmontage des Produktes ermöglicht wird. Zudem können aufwändige Schnittstellen zwischen ansonsten physisch separierten Komponenten vermieden werden, was die Montage weiter vereinfacht und die Zuverlässigkeit des Gerätes erhöhen kann. Insgesamt kann durch eine integrale Produktarchitektur oftmals ein kompakteres, leichteres Produkt angeboten werden, als bei einer entsprechenden, modularen Architektur.<sup>14</sup>

Die funktionale Mehrfachnutzung von Komponenten wird jedoch durch eine stark gekoppelte, oftmals schwer zu durchschauende Produktarchitektur erkauft, die den Austausch, die Kontrolle und die Wiederverwendbarkeit von Komponenten kaum ermöglicht und aufgrund ihrer Abgeschlossenheit schwer erweiterbar ist. Bei Defekten einzelner Komponenten muss daher oftmals das komplette Gerät ersetzt werden. Eine Standardisierung einzelner Komponenten ist aufgrund ihrer produktsspezifischen Verwendung (außer bei extrem hohen Stückzahlen) wenig sinnvoll. Ebenso wenig besteht die Möglichkeit, in einer integralen Produktarchitektur Komponenten individuell zu kombinieren und an spezielle Kundenbedürfnisse anzupassen. Integrale Produktarchitekturen sind daher insbesondere

<sup>13</sup>Vgl. Ulrich und Seering (1990), S. 223 f.

<sup>14</sup>Vgl. Ulrich und Seering (1990), S. 224.

für Einzelproduktentwicklungen geeignet, bei denen die Leistungsmaximierung oder die Minimierung der Materialkosten im Vordergrund steht.

Allerdings sind auch Hybrid-Formen aus modularer und integraler Produktarchitektur möglich. So können die Vorteile integraler Architekturen für Teilbereiche eines insgesamt modular konzipierten Produktes genutzt werden. Dies ist prinzipiell immer dann sinnvoll, wenn der Aufbau eines Moduls selbst nicht variiert werden muss, um verschiedenen Kundenanforderungen gerecht zu werden.

### 4.5.3 Die Gestaltung der Produktarchitektur

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Grundlagen der Produktarchitektur erläutert und modulare von integralen Produktarchitekturen unterschieden. Doch wie findet man angesichts der vielen Gestaltungsmöglichkeiten die „optimale“ Produktarchitektur? Dieser Frage widmet sich der folgende Abschnitt.

Bei der Produktarchitekturgestaltung handelt es sich um ein mehrdimensionales Gestaltungsproblem, bei dem unterschiedliche Perspektiven und Anforderungen zu einem Gesamtoptimum zusammenzuführen sind. Drei Gestaltungsperspektiven sind dabei von besonderer Bedeutung und werden im Folgenden detaillierter betrachtet:

1. Technische Gestaltung der Produktarchitektur:
  - Welche Anforderungen und Funktionen soll das Produkt erfüllen?
  - Welche Lösungsprinzipien werden eingesetzt?
  - Aus welchen Komponenten und Modulen soll das Produkt bestehen?
  - Wie lässt sich der Herstellungs- und Montageprozess optimieren?
2. Variantengerechte Gestaltung der Produktarchitektur:
  - Welche Varianz soll durch die Produktarchitektur abgedeckt werden?
  - Wie kann diese Varianz möglichst einfach realisiert werden?
  - Welche Komponenten und Module werden standardisiert oder wiederverwendet?
3. Organisatorische Gestaltung der Produktarchitektur:
  - Wie verteilen sich Entwicklungs- und Fertigungsumfänge auf die beteiligten organisatorischen Einheiten (Personen, Teams, Abteilungen, Lieferanten)?
  - Wie kann der Koordinationsaufwand minimiert werden?
  - Welche Umfänge werden intern entwickelt und produziert? Welche werden von externen Lieferanten zugekauft?

#### 4.5.3.1 Technische Gestaltung der Produktarchitektur

Mit der technischen Gestaltung der Produktarchitektur wird der Grundstein für das spätere Produkt gelegt. Ausgangspunkt sind die Anforderungen an das Produkt, aus denen schrittweise die Funktions- und Produktstruktur entwickelt werden. Eine ergänzende Kosten- und Montageoptimierung führt zum ersten Entwurf der Produktarchitektur, bevor weitere Gestaltungsaspekte einfließen.

**Anforderungen systematisch erfassen** Am Anfang der Produktarchitekturgestaltung stehen der Kunde und dessen Anforderungen an das künftige Produkt. Die Anforderungen werden systematisch aufgenommen und nach Möglichkeit quantifiziert, so dass die Erfüllung später messbar wird. Neben den Kundenanforderungen sind gleichermaßen spezifische Anforderungen aus Entwicklung, Montage, Fertigung, Einkauf, Logistik und Service zu berücksichtigen. Aufgrund der typischerweise langfristig wirksamen Entscheidungen, die bei der Definition der Produktarchitektur getroffen werden, sind auch künftige Anforderungen zu antizipieren, die sich aus Markt- und Technologietrends ergeben. Ein umfassendes, in sich schlüssiges und von allen beteiligten Bereichen mitgetragenes Anforderungskonzept ist Voraussetzung für eine effiziente und zielgerichtete Produktarchitekturgestaltung.

**Funktionsstruktur definieren** Aus den zuvor definierten Anforderungen wird die Funktionsstruktur des Produktes abgeleitet. Mit Hilfe der Funktionsstruktur werden gemäß Abschn. 4.3.1 die Haupt- und Teilfunktionen des Produktes beschrieben. Die funktionale Betrachtungsweise ermöglicht es, von existierenden technischen Lösungen zu abstrahieren und die Funktionalität des Produktes zu hinterfragen. Funktionen sind konsequent in der Form „Substantiv + Verb“ zu formulieren (z. B. „Dampf erzeugen“). Die Funktionsstruktur sollte zwar primär aus Sicht des späteren Kunden aufgebaut sein, daneben sind aber auch die originären Funktionen des Produktes zu definieren, die der Kunde als selbstverständlich erachtet und die demgemäß nicht im Lastenheft stehen, wie z. B. die Funktion „Strom leiten“. In der Regel genügen drei Hierarchieebenen für die Darstellung der Funktionsstruktur. Eine zu detaillierte Darstellung reduziert die Übersichtlichkeit und erhöht den Aufwand bei der Transformation in die Produktstruktur.

**Produktstruktur entwickeln und modularisieren** Die Entwicklung der „optimalen“ Produktstruktur ist der Kern der Produktarchitekturgestaltung. Dazu wird die Funktionsstruktur unter Anwendung von Lösungsprinzipien in eine bzw. mehrere alternative Produktstrukturen „übersetzt“. Durch Anwendung unterschiedlicher Lösungsprinzipien lassen sich dieselben Produktfunktionen durch unterschiedliche Komponenten und somit alternative Produktstrukturen realisieren.

Mit der Produktstruktur werden die zentralen Komponenten des Produktes definiert. Bei mechatronischen Systemen umfassen diese neben mechanischen Komponenten meist auch Elektronik- oder Softwarekomponenten. Zugleich legt die Produktstruktur den physischen Zusammenbau der Komponenten in Baugruppen und Module fest.

Von einem „Modul“ anstelle einer „Baugruppe“ kann gemäß der Definition in Abschn. 4.5.2.1 dann gesprochen werden, wenn es gelingt, in dem Modul die Erfüllung bestimmter Funktionen zu bündeln und damit das Kriterium der funktionalen und physischen Unabhängigkeit zu erfüllen. Erst in der Verknüpfung von Funktionsstruktur und Produktstruktur wird transparent, wie sich die Funktionalität im Produkt verteilt, welche funktionalen Schnittstellen bestehen und wo Funktionen möglicherweise redundant abgebildet sind. Die „funktionale Kapselung“ von Modulen ist ein wesentliches

Optimierungskriterium bei der Produktarchitekturgestaltung, denn es gelingt dadurch, Produktfunktionen klar einzelnen Modulen zuzuweisen, anstatt sie im Produkt zu verteilen. Dies ist insbesondere bei Funktionen sinnvoll, die später separat geprüft werden sollen, zur Variantenbildung dienen oder spezifische Entwicklungskompetenzen erfordern.

Es zeigt sich also, dass die funktionale Sicht zwar einen wichtigen Stellenwert bei der Produktarchitekturgestaltung (und speziell der Modularisierung der Produktstruktur) einnimmt, aber darüber hinaus eine Reihe weiterer Gestaltungsaspekte zu berücksichtigen sind.

Die folgende Abb. 4.17 zeigt beispielsweise die Produktarchitektur eines Fahrzeug-Türmoduls. Erkennbar sind die Funktionen, die Komponenten sowie die vier Module der Türe. Zusätzlich gezeigt werden Informationen zu Bauteilkosten und -varianz (siehe nächster Abschnitt).

**Montageoptimierung durchführen („Design-to-Manufacturing“)** Ein wesentlicher Gestaltungsaspekt beim Aufbau der Produktarchitektur ist die Fertigung und Montage des Produktes (zumindest bei mechanischen oder mechatronischen Produkten). Bewährt hat sich daher eine montageorientierte Darstellung der Produktarchitektur, in der Komponenten und Baugruppen (bzw. Module) in der Reihenfolge ihrer Montage angeordnet sind, so dass sich eine vereinfachte Abbildung des Montageprozesses ergibt.<sup>15</sup>

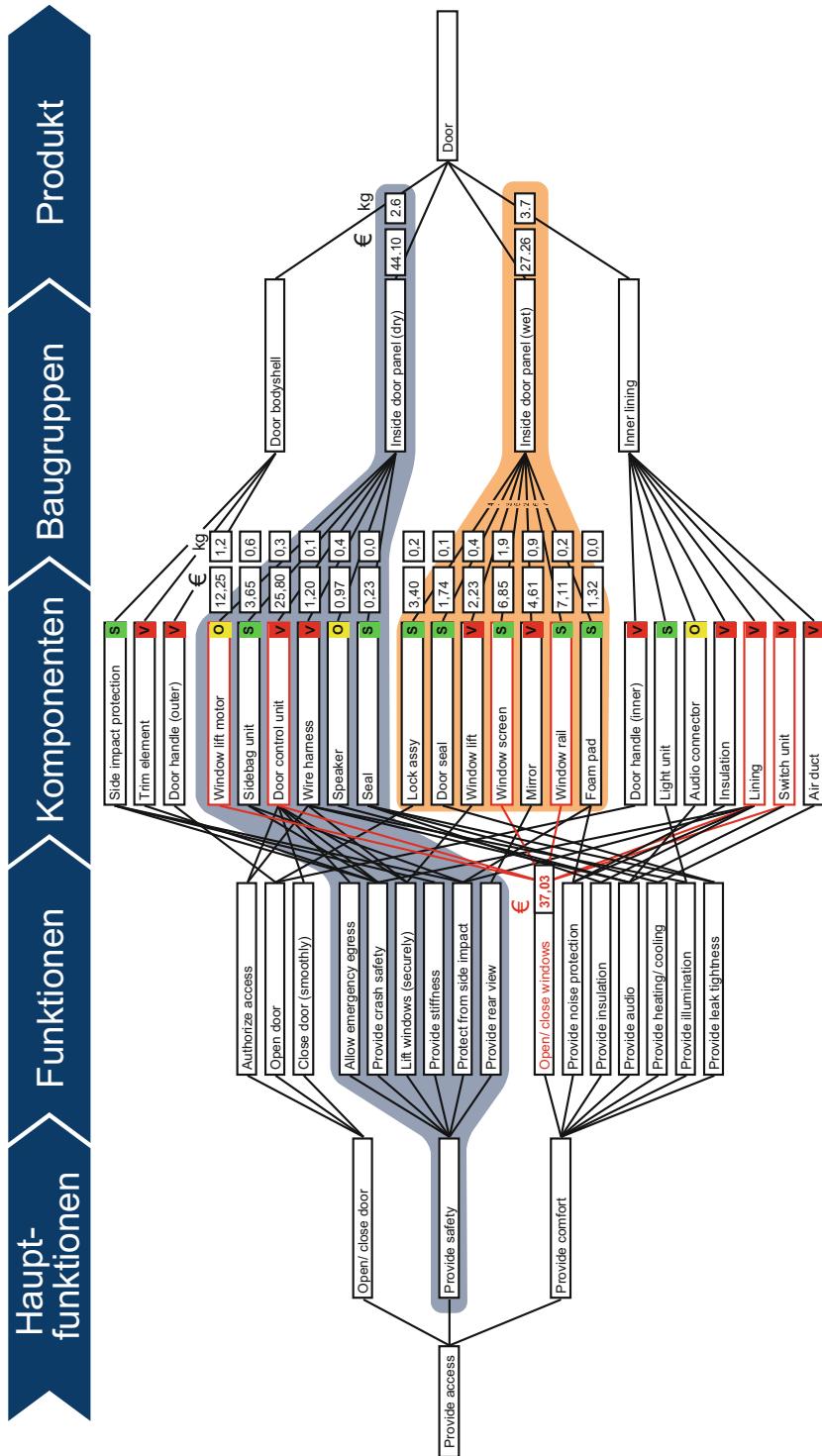
Auf diese Weise fließen Belange der Fertigung und Montage frühzeitig in die Produktarchitekturgestaltung mit ein: Welche Komponenten werden zu Vorbaugruppen montiert, welche kommen erst in der Endmontage zum Einsatz? Sind die definierten Module mit den geplanten Fertigungseinrichtungen montierbar? Kann durch eine stärkere Modularisierung die Komplexität der Endmontage reduziert werden?

Beispielsweise musste die Modularisierung eines Cockpitmoduls angepasst werden, nachdem festgestellt wurde, dass die Montage des Fahrzeugs mit den bestehenden Fertigungseinrichtungen aufgrund der Größe und des Gewichts des Moduls gar nicht möglich gewesen wäre.

**Kostenoptimierung durchführen („Design-to-Cost“)** Die Produktarchitektur bildet die Grundlage für eine erste Kostenabschätzung. Den Komponenten und Modulen des Produktes werden hierzu die geschätzten Herstellkosten und ggf. auch anfallende Entwicklungskosten zugeordnet. So lassen sich in der Produktarchitektur frühzeitig besonders kostenintensive Bereiche erkennen und gezielt Optimierungsmaßnahmen ergreifen. Insbesondere können detailliert Ziel-Kosten für Komponenten und Module definiert, den aktuellen Ist-Kosten gegenübergestellt und Abweichungen identifiziert werden.

Über die Verbindung zur Funktionsstruktur lassen sich darüber hinaus die Kosten der Funktionserfüllung bestimmen. Hierzu werden die Kosten jeder Komponente anteilig auf alle Funktionen verteilt, zu deren Erfüllung die Komponente beiträgt. Dadurch werden die

<sup>15</sup>Vgl. zur hierarchischen Darstellung von Montageprozessen und Strategien zur Erstellung von Montagesequenzen (Ye und Urzi 1996), S. 2216–2224.



**Abb. 4.17** Beispiel Produktarchitektur eines Türmoduls (mit ergänzenden Informationen zu Kosten, Gewicht, Varianten und Lieferanten)  
(Quelle: ID-Consult GmbH)

wesentlichen Kostentreiber auf der Funktions-, Komponenten- und Modulebene sichtbar. Diese funktionale Sicht bringt im Vergleich zu der „klassischen“ komponentenorientierten Sicht oft erstaunliche Optimierungspotenziale ans Licht. Die Leitfragen lauten: „Ist der Kunde bereit, diesen Betrag für diese Funktion zu bezahlen? Wie kann diese Funktion kostengünstiger realisiert werden?“

Beispielsweise zeigte sich bei der Entwicklung einer neuen Waschmaschine, dass die Funktion „sicheren Transport gewährleisten“ fast 10 % der Materialkosten verschlang. Durch Verwendung alternativer Lösungsprinzipien konnten diese Kosten erheblich reduziert werden.

#### 4.5.3.2 Variantengerechte Gestaltung der Produktarchitektur

In den vorangegangenen Ausführungen wurde die Produktarchitekturgestaltung für ein einzelnes Produkt beschrieben. Eine wesentliche Zielsetzung besteht jedoch auch darin, mit geringstmöglichen Entwicklungs- und Fertigungsaufwand eine hohe Zahl von Produktvarianten erzeugen zu können.<sup>16</sup> Hieraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Gestaltung der Produktarchitektur.

Eine modulare Produktarchitektur stellt die Grundlage für ein variantenreiches und zugleich kostengünstig zu realisierendes Produktangebot dar. Die positiven Effekte der Modularisierung (vgl. Abschn. 4.5.2.3) lassen sich für die einfache Variantenbildung hervorragend nutzen: Durch die *Wiederverwendung* bereits entwickelter und produzierter Module eines Produktes lassen sich durch Skalen- und Lernkurveneffekte erhebliche Einsparungspotenziale in Entwicklung, Einkauf und Produktion realisieren. Indem lediglich einzelne Module gegen neu entwickelte Module *ausgetauscht* werden, sind bei einer modularen Produktarchitektur neue Produktvarianten relativ einfach zu erzeugen. Ebenso sind bestehende modulare Produktarchitekturen bei entsprechender Schnittstellengestaltung einfach *erweiterbar*, indem zusätzliche Module hinzugefügt werden. Eine hohe Produktvielfalt lässt sich mit vergleichsweise geringem Entwicklungs- und Produktionsaufwand zudem durch die *Kombination* verschiedener Module im „Baukastensystem“ realisieren, vorausgesetzt die Schnittstellen sind weitgehend *standardisiert*.

Die variantengerechte Gestaltung der Produktarchitektur wird damit zu einem wesentlichen Stellhebel zur Beherrschung der Variantenvielfalt. Dazu ist eine Analyse des zu realisierenden Variantenspektrums erforderlich, woraus die „Variantentreiber“ abgeleitet werden. Die Gestaltungsaufgabe besteht nun darin, den Einfluss dieser Variantentreiber auf die Produktarchitektur zu minimieren, ohne zu viel Differenzierungspotenzial zwischen den Produktvarianten aufzugeben.

**Variantentreiber identifizieren** Aus den unterschiedlichen Produktanforderungen sind zunächst die differenzierenden, d. h. variantenbildenden Merkmale, abzuleiten (z. B. unterschiedliche Farben, Leistungsklassen oder Ausstattungsmerkmale eines Produktes). Diese

<sup>16</sup>Vgl. Ulrich (1995), S. 427–429.

<b>Steuerungsprinzip</b>		
Feuchtegesteuert		Zeitgesteuert
<b>Steckertyp</b>		
ohne Stecker	Eurostecker	CH-Stecker
UK-Stecker	AU-Stecker	
<b>Netz</b>		
240 V / 60 Hz	208 V / 60 Hz	220-240 V / 50 Hz
2 x 230 V / 50 Hz		
<b>Trommelbeleuchtung</b>		
mit Trommelbeleuchtung	ohne Trommelbeleuchtung	
<b>Absicherung</b>		
30 A	16 A	10 A / 16 A
13 A	2 x 10 A	
<b>Approbation</b>		
CE	UC-Approbation	CSA
AU		
<b>Anzeige</b>		
ohne Anzeige	LED klein	LED gross (7-Segment)
LCD		

**Abb. 4.18** Beispiel einiger Variantentreiber (Merkmale und Ausprägungen) eines Wäschetrockners.  
(Quelle: BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH)

„Variantentreiber“ und ihre möglichen Ausprägungen werden möglichst vollständig in einer Übersicht zusammengestellt.

Die folgende Übersicht zeigt beispielsweise die Variantentreiber eines Wäschetrockners.

Mit Hilfe der darauf folgenden Variantentreiberanalyse wird die Auswirkung jedes einzelnen Variantentreibers auf die Komponenten der Produktarchitektur ermittelt. Leitfrage ist dabei jeweils: Welche Komponenten müssen variiert werden, um die geforderte Varianz zu realisieren? Zum Beispiel sind zur Realisierung der Farbvarianz eines Mobiltelefons unterschiedlich eingefärbte Gehäuseunter- und -oberschalen erforderlich, während Display und Elektronikkomponenten unverändert bleiben können.

Aus dieser Analyse werden einerseits die besonders „schmerzhaften“ Variantentreiber erkennbar und können ggf. eliminiert werden, andererseits lassen sich Ansätze entwickeln, um die erforderliche Varianz einfacher zu realisieren und ihre Auswirkungen auf weniger Komponenten bzw. Module zu beschränken.

**Standard, Varianz und Optionen definieren** Sind die Variantentreiber und ihre Auswirkungen identifiziert (und nach Möglichkeit reduziert worden), wird die Varianz in der Produktarchitektur verankert. Bewährt hat sich eine einfache Klassifizierung der Komponenten und Module in Standard (S), Varianz (V) und Option (O). Während Standardkomponenten in jedem Produkt in gleicher Form auftreten (z. B. immer dasselbe

Display eines Mobiltelefons), werden variantenbehaftete Komponenten je nach Produktvariante variiert (z. B. schwarzes oder blaues Gehäuse). Optionale Komponenten werden bei bestimmten Produktvarianten zusätzlich angeboten (z. B. optionales Ladegerät).

Im Zuge der variantengerechten Produktarchitekturgestaltung werden variantenbehaftete Komponenten bzw. Standardkomponenten möglichst in unterschiedlichen Modulen separiert. Dies schafft variantenfreie Module, die in hoher Stückzahl hocheffizient selbst hergestellt oder eingekauft werden können. Andere Module dagegen stellen die erforderliche Varianz „gekapselt“ zur Verfügung und erlauben damit die Realisierung eines breiten Variantenspektrums bei einem Minimum an Varianz in der Produktarchitektur.

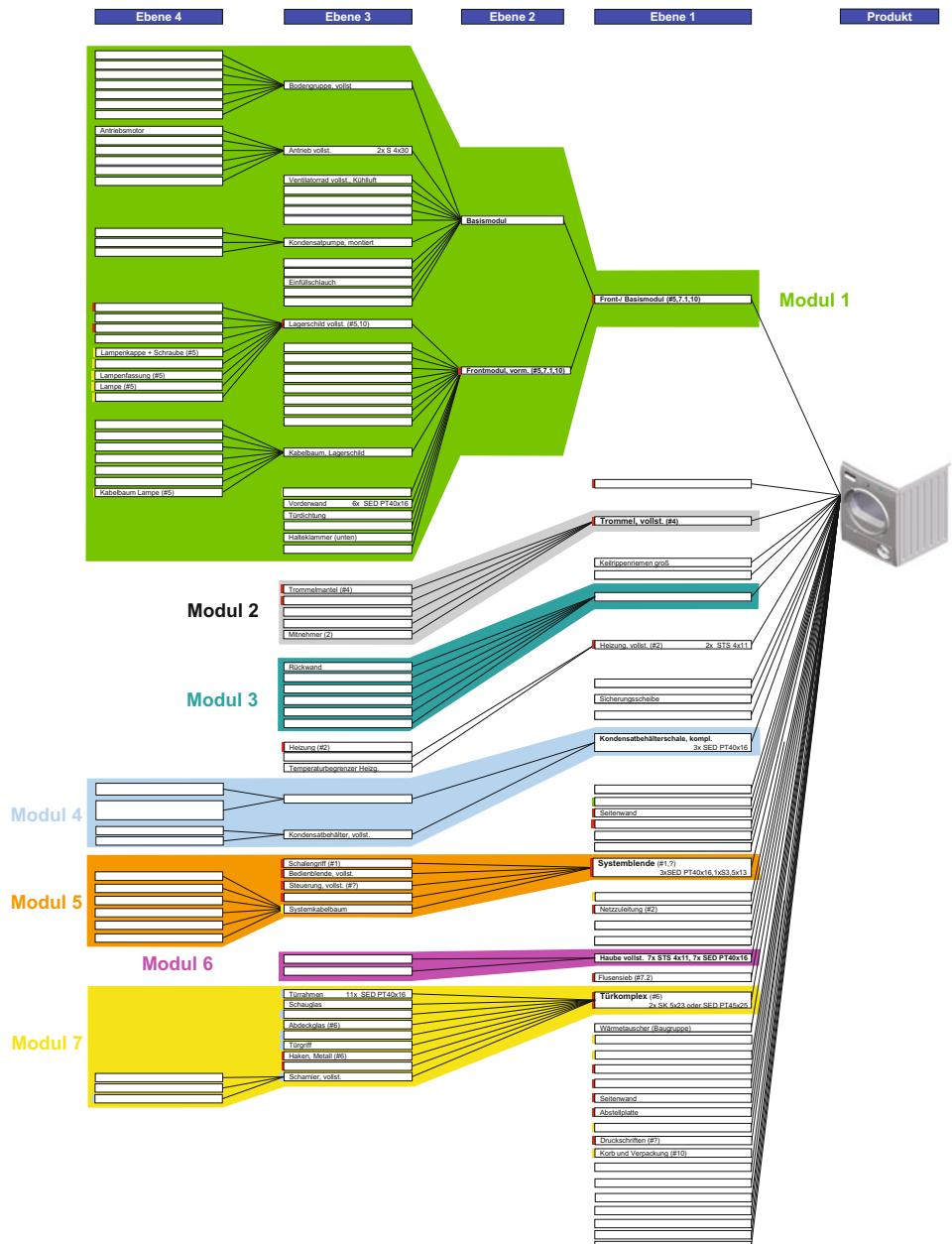
Beispielsweise ließ sich bei der Produktarchitekturgestaltung für einen neuen Wäschetrockner ein variantenarmes Basismodul bilden, das auf einer separaten Montagelinie hocheffizient gefertigt wurde und die Kerntechnologie des Trockners enthielt (Modul 1 in Abb. 4.19). Einer der Hauptträger der Varianz war dagegen die Systemblende, in der unterschiedlichste Ausstattungsmerkmale realisiert werden konnten – vom einfachen Einsteigermodell mit wenigen Tasten bis zum Premiumgerät mit großem Touch-Display und Sprachausgabe (Modul 5). Ein Großteil der Varianz wurde erst in den letzten Montageschritten zugefügt.

**Konfigurationslogik definieren** Die variantengerecht optimierte Produktarchitektur stellt die Voraussetzung für die spätere Konfiguration von Produktvarianten dar. Meist ist nicht jede beliebige Kombination von Komponenten bzw. Modulen technisch möglich und auch gar nicht gewünscht. Die einschränkenden Ausschlüsse („Komponente A ist nicht mit B kombinierbar“) und Zwangskopplungen („Wenn Komponente X verwendet wird, dann zwangsläufig auch Komponente Y“) definieren die Konfigurationslogik. Diese kann in Konfigurationssystemen hinterlegt werden, die dem Kunden eine internetbasierte Produktkonfiguration erlauben. Gleichzeitig werden auf Basis der gewählten Konfiguration automatisiert entsprechende Vertriebsunterlagen und teilweise bereits entsprechende Fertigungsstücklisten erzeugt. Ohne eine modulare Produktarchitektur mit minimierter Produktvarianz und eindeutig zugeordneten Variantentreibern wird eine solche Konfigurationslogik bei komplexeren Produkten jedoch schnell unberehrischbar. Eine Pflege ist dann nur mit extrem hohem Aufwand möglich. Der ursprüngliche Wettbewerbsvorteil kann damit zu Inflexibilität und Erstarrung des Produktprogramms führen.

#### 4.5.3.3 Organisatorische Gestaltung der Produktarchitektur

Die Produktarchitektur definiert nicht nur den zuvor dargestellten technischen Grundaufbau eines Produktes und dessen Varianz, sie hat auch maßgeblichen Einfluss auf die organisatorische Umsetzung und Effizienz in der gesamten nachgelagerten Wertschöpfungskette. Die Organisation ist daher ein weiterer wichtiger Einflussfaktor bei der Produktarchitekturgestaltung.

An der Entwicklung und Herstellung eines Produktes ist typischerweise eine Vielzahl an Personen, Teams, Abteilungen, externen Partnern und Lieferanten beteiligt, die in ihrem Zusammenspiel zu koordinieren sind. Dabei besteht ein direkter Zusammenhang



**Abb. 4.19** Produktstruktur Wäschetrockner. (Quelle: Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH)

zwischen der technischen Komplexität des Produktes und der organisatorischen Komplexität: Jede technisch bedingte Schnittstelle erzeugt organisatorischen Koordinations- und Abstimmungsbedarf.

Hier weist die modulare Produktarchitektur wiederum klare Vorteile auf: Da ihre Module nur schwach ausgeprägte Abhängigkeiten zeigen und Schnittstellen klar definiert sind, können sie von verschiedenen Beteiligten relativ autonom bearbeitet werden. Durch den Einsatz effizienter, stark entkoppelter Koordinations- und Kooperationsformen kann der Koordinationsaufwand minimiert werden. Die Verantwortung für Entwicklung und/oder Fertigung von Modulen lässt sich damit einfacher auf unterschiedliche Personen, Teams oder Unternehmen verteilen. Oder mit anderen Worten:

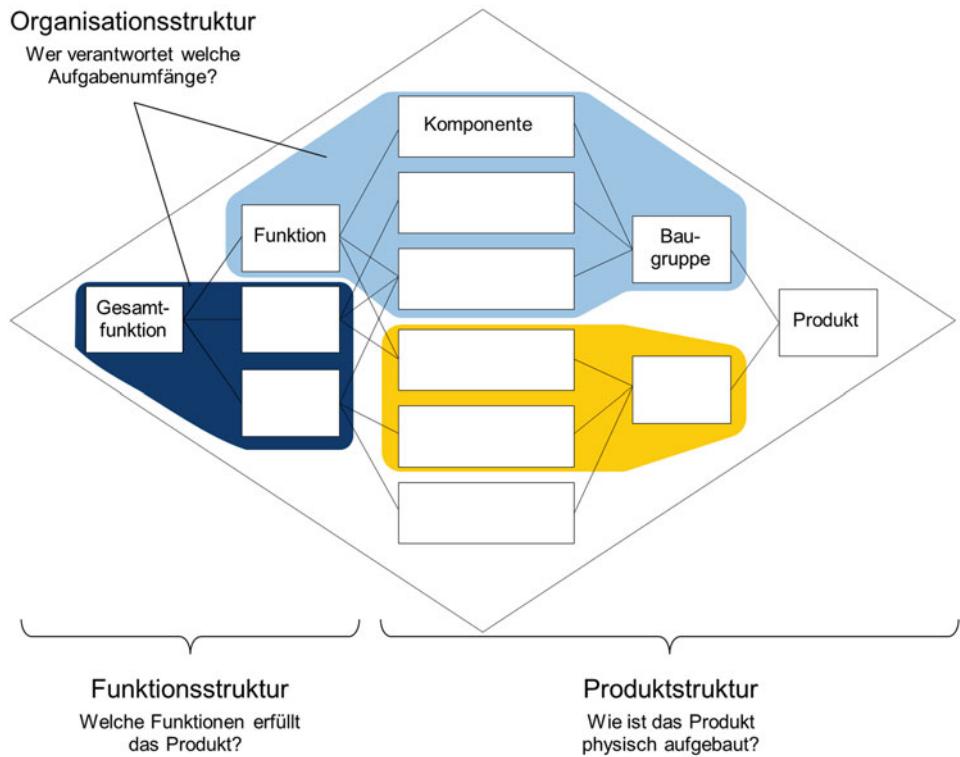
Die modulare Produktarchitektur ermöglicht eine Modularisierung der Organisation, womit sich die Komplexität im Entwicklungs- und Fertigungsprozess erheblich senken lässt.<sup>17</sup>

Im Extremfall kann die Verantwortung für Entwicklung, Fertigung und Test von kompletten Modulen an externe Lieferanten (sog. Systemlieferanten) oder Standorte ausgelagert werden, die eigene Entscheidungskompetenz und Ergebnisverantwortung besitzen. Als zentrale Aufgabe des Herstellers verbleibt in jedem Fall, die Verantwortung für das Gesamtsystem gegenüber den Kunden wahrzunehmen. Eine wichtige Aufgabe ist es daher, in der Organisation die Beurteilungskompetenz gegenüber den Systemlieferanten aufrechtzuerhalten.

Damit wird deutlich, dass die Produktarchitekturgestaltung erhebliche Potenziale im Bereich der organisatorischen Gestaltung des Produktentstehungsprozesses eröffnet. Insofern müssen die Gestaltungsaspekte Technik, Varianz und Organisation bei der Entwicklung der Produktarchitektur gleichermaßen berücksichtigt und aufeinander abgestimmt werden.

Um diese gemeinsame Gestaltung zu ermöglichen, wird die Produktarchitektur durch die Struktur der Entwicklungs- und Fertigungsorganisation überlagert. Die in der Produktarchitektur definierten Funktionen, Komponenten und Module werden dabei als Aufgabenumfänge aufgefasst und organisatorischen Einheiten wie z. B. Personen, Abteilungen, Lieferanten etc. zugeordnet (s. Abb. 4.20). Bei dieser Zuordnung ist die strategische Entscheidung über Eigen- und Fremdumfänge („Make-or-Buy“) zu treffen und dann die Aufteilung der Fremdumfänge auf Lieferanten vorzunehmen. Diese Entscheidungen können maßgeblichen Einfluss auf die Produktarchitekturgestaltung haben – und umgekehrt.

<sup>17</sup>Konzept und Potenziale der modularen Organisation werden ausführlich dargestellt in Göpfert (1998), S. 129–191.



**Abb. 4.20** Darstellung von Produktarchitektur und überlagerter Entwicklungsorganisation

**Eigen- und Fremdumfänge definieren („Make-or-buy“)** Eine wesentliche unternehmerische Entscheidung im Kontext der Produktarchitekturgestaltung besteht darin, die „Kernkompetenzen“ des Herstellers bezüglich Entwicklung, Fertigung und Montage zu definieren. Entsprechende Eigenumfänge lassen sich auf Basis der in der Produktarchitektur dargestellten Funktionen, Komponenten und Modulen präzise identifizieren und abbilden. Ebenso lassen sich die Bereiche innerhalb der Produktarchitektur definieren, die aufgrund mangelnder strategischer Relevanz, Kompetenz oder Kapazität als Fremdumfänge von externen Partnern entwickelt, gefertigt und/oder montiert werden sollen. Diese Abgrenzung muss sich in der Produktarchitekturgestaltung widerspiegeln: Nur wenn die technische Modularisierung den gewünschten organisatorischen „Schnittlinien“ entspricht, ist eine effiziente Arbeitsteilung möglich.

Beispielsweise stellte sich bei der Diskussion über die mögliche Fremdentwicklung eines umfangreichen Funktionsumfangs für ein Cockpitmodul heraus, dass aktuell kein Lieferant die erforderlichen Kompetenzen nachweisen konnte. Daraufhin wurde die Modulstruktur entsprechend optimiert und nur ein kleineres Modul mit reduziertem Funktionsumfang fremdvergeben.

**Lieferantenstruktur gestalten** Die definierten Fremdumfänge können nun auf potenzielle Lieferanten aufgeteilt werden. Um übermäßigen Koordinationsaufwand zu vermeiden, ist es auch hier empfehlenswert, die organisatorische Aufteilung der Umfänge stark an der Produktarchitektur zu orientieren, d. h. eine modulweise Vergabe von Entwicklungs-, Fertigungs- und/oder Montageumfängen vorzunehmen.

Beispielsweise wurde die Produktarchitektur einer neuen Wäschetrocknerplattform so optimiert, dass eine Fremdvergabe von Modulen an spezialisierte Lieferanten möglich wurde. Diese Lieferanten waren verantwortlich für die Entwicklung, Fertigung und Vormontage ihrer Module, die zum Teil komplettiert angeliefert und durch den Hersteller endmontiert wurden.

Diese Lieferantenstruktur ist in der beispielhaften Abb. 4.19 anhand der farbig markierten Flächen erkennbar. Jede Farbe repräsentiert hierbei einen Lieferanten.

#### 4.5.3.4 Bewertung und Optimierung von Produktarchitekturen

Der Weg zur „optimalen“ Produktarchitektur erfolgt typischerweise als iterativer Prozess, bei dem eine Vielzahl unterschiedlicher Gestaltungsaspekte gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Diese sind in der folgenden Tab. 4.2 zusammenfassend dargestellt.

Die zahlreichen Gestaltungsmöglichkeiten und Wechselwirkungen beim Aufbau von Produktarchitekturen führen zu einem mehrdimensionalen Optimierungsproblem mit einer sehr hohen Zahl alternativer Lösungen. Dieses Optimierungsproblem ist nur bei sehr einfachen Produkten mathematisch abbildungbar und lösbar.

In der Praxis zweckmäßiger ist der Aufbau mehrerer alternativer Produktarchitekturen, die anschließend systematisch bewertet und iterativ optimiert werden. Hilfreich ist es dabei, zu Beginn dieses Prozesses auf Basis der zentralen Zielsetzungen „Leitprinzipien“ zu definieren, entlang derer Alternativen entwickelt werden (z. B. „Kostenoptimierte Produktarchitektur“, „Maximale Variabilität“, „Systemlieferant für Modul XY“ usw.).

Diese alternativen Produktarchitekturen lassen sich in unterschiedlichen „Rauten“ (vgl. Abschn. 4.4.4) einfach gegenüberstellen und bewerten. Die Vorteile der bewerteten Alternativen können oftmals zu einer neuen, weiter optimierten Alternative kombiniert werden.

Die Bewertung erfolgt anhand einer Nutzwertanalyse, welche als Bewertungskriterien die definierten Anforderungen aufgreift.<sup>18</sup> Daneben dienen spezifische Kennzahlen zur Bewertung der Produktarchitektur. Eine Übersicht über mögliche Kennzahlen gibt Tab. 4.2. So kann z. B. der Grad der „Funktionskapselung“ anhand der durchschnittlichen Anzahl erforderlicher Module je Funktion gemessen werden. Der Grad der Modularisierung aus Sicht der Montage ergibt sich aus der Anzahl an Endmontagepositionen; und der Grad der Standardisierung errechnet sich durch die Anzahl an Standardkomponenten im Verhältnis zur Gesamtzahl an Komponenten. Diese Kennzahlen sind insbesondere zum relativen Vergleich von alternativen Produktarchitekturen wertvoll und machen die Konsequenzen von Optimierungsbemühungen unmittelbar bewertbar.

<sup>18</sup>vgl. dazu detailliert Göpfert (1998), S. 246 ff.

**Tab. 4.2** Übersicht über Gestaltungsaspekte der Produktarchitektur, mögliche Optimierungsansätze und Kennzahlen

Gestaltungsaspekt	Kernfrage	Optimierungsansätze	Kennzahl
<b>Technische Gestaltung</b>			Legende: # Anzahl
Anforderungen	Welche Anforderungen soll das Produkt erfüllen?	kostentreibende Anforderungen eliminieren	Anteil erfüllter Anforderungen
Funktionen	Welche Funktionen werden aus den Anforderungen abgeleitet?	kostentreibende Funktionen eliminieren oder zur Differenzierung nutzen	Kosten je Funktion
Lösungsprinzipien	Welche Lösungsprinzipien werden zur Funktionserfüllung eingesetzt?	Anzahl erforderlicher Komponenten und Kosten zur Funktionserfüllung minimieren	#Komponenten je Funktion; Kosten je Funktion
Komponenten	Aus welchen Komponenten besteht das Produkt? Welche Funktionen erfüllen diese?	Anzahl der Komponenten minimieren Anzahl Komponenten je Funktion minimieren	#Komponenten #Komponenten je Funktion
Baugruppen und Module	Welche Komponenten werden zu Baugruppen bzw. Modulen zusammengefasst?	Funktionen, Varianz, Montageumfänge, Arbeitsumfänge in Modulen kapseln	#Module je Funktion #Variantentreiber je Modul
Montage	In welcher Reihenfolge werden die Komponenten und Baugruppen montiert?	Montageaufwand minimieren Vorbaugruppen bilden	#Positionen in Endmontage
Kosten	Wie verteilen sich Herstellkosten auf Komponenten und Module? Was sind die Kostentreiber?	Zielkosten für Gesamtprodukt, Module und Komponenten erreichen	Ist-Kosten/Zielkosten
<b>Variantengerechte Gestaltung</b>			
Variantentreiber und Ausprägungen	Welche Merkmale erzeugen Produktvarianten? Welche Merkmalsausprägungen sind geplant?	wenig kundenrelevante Variantentreiber und Ausprägungen eliminieren Auswirkung der Variantentreiber auf das Produkt minimieren	#Variantentreiber #betroffener Komponenten je Variantentreiber
Produktvarianz	Welche Komponenten sind variantenbehaftet, welche optional, welche gleich?	Anteil der Standardkomponenten maximieren Variantenteile in Modulen kapseln	#Standardteile/ #Komponenten gesamt #Variantenteile je variantenbehafteter Komponente

**Tab. 4.2** (Fortsetzung)

Konfiguration	Welche Kombinationen von Komponenten sind zulässig?	Vermeidung komplexer Konfigurationsregeln	-
<b>Organisatorische Gestaltung</b>			
Eigen-/Fremdanteil	Welcher Umfang wird intern entwickelt, hergestellt und montiert, welcher extern?	Kernkompetenzen intern abwickeln, Fremdumfänge in separaten Modulen kapseln	#eigenverantwortete Komponenten/ #Komponenten gesamt
Lieferantenstruktur	Wie werden die externen Umfänge auf Lieferanten verteilt?	Anzahl der Lieferanten minimieren Modularisierung entsprechend Lieferantenumfängen und -kompetenz	#Lieferanten #Schnittstellen zwischen Lieferanten

Mit der Auswahl und konstruktiven Umsetzung einer Produktarchitektur im Entwicklungsprozess ist ihre Gestaltung jedoch meist noch nicht beendet. Über den Lebenszyklus eines Produktes erfolgen typischerweise eine Vielzahl von Änderungen, die zum Teil auch die Produktarchitektur betreffen. So werden z. B. neue Funktionen und Produktvarianten ergänzt, Module verändert und Montagereihenfolgen optimiert. Um einen schleichenden Verfall der zu Anfang noch wohl strukturierten Produktarchitektur zu verhindern, ist eine kontinuierliche Pflege erforderlich. Auch hierzu dienen Kennzahlen, mit deren Hilfe beispielsweise regelmäßig der Standardisierungsgrad überprüft werden kann.<sup>19</sup>

#### 4.5.3.5 Methodik und Softwareunterstützung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Bedeutung der Produktarchitektur und ihrer Gestaltung aufgezeigt. Dennoch existieren in Wissenschaft und Praxis nur wenige methodische Ansätze zur Produktarchitekturgestaltung.<sup>20</sup> Dies folgt einerseits aus der hohen Komplexität der Gestaltungsaufgabe aufgrund der verschiedenen einzubehandelnden Perspektiven. Zum anderen sind Entscheidungen bezüglich der Produktarchitektur zu einem so frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess zu treffen, dass oftmals die Entscheidungsbasis noch unvollständig und teilweise unklar ist.

Eine in der Industrie erfolgreich angewandte Methodik, um komplexe Produktarchitekturen systematisch zu entwickeln und zu optimieren ist die METUS-Methodik.<sup>21</sup> Das Grundprinzip basiert auf der bereits in Abschn. 4.5.1.3 eingeführten Rautendarstellung,

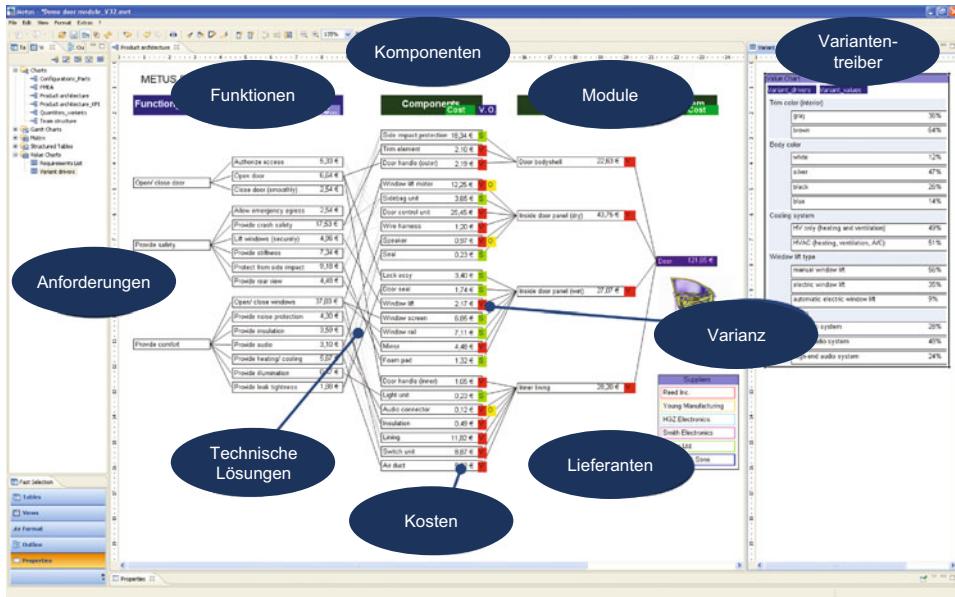
<sup>19</sup>vgl. Schillings et al. (2008).

<sup>20</sup>vgl. Rapp (1999).

<sup>21</sup>METUS steht für „METHodische Unterstützung zur Systembildung“. Die Methode wurde in Kooperation zwischen der Daimler AG und der Münchener Unternehmensberatung ID-Consult entwickelt. Mehr Informationen unter [www.id-consult.com](http://www.id-consult.com).



**Abb. 4.21** Vorgehen bei der Gestaltung einer Produktarchitektur nach der METUS-Methodik. (Quelle: ID-Consult)



**Abb. 4.22** Darstellung der Produktarchitektur einer modularen Autotür in der Softwarelösung METUS®. (Quelle: ID-Consult)

die mehrere Sichtweisen auf die Produktarchitektur verbindet. Diese einfache Darstellung der Produktarchitektur schafft Transparenz und ermöglicht durch eine bereichsübergreifende Diskussion eine frühzeitige Definition des Systemkonzepts. Die Darstellung wird mit zunehmender Konkretisierung immer weiter verfeinert und mit weiteren Informationen angereichert (z. B. Kosten, Lieferanten, Stückzahlen, Montagereihenfolge, Varianz usw.) und stellt schließlich die „Blaupause“ für die künftige Entwicklung dar. Kosten- und zeitintensive Iterationen in den späteren Phasen der Entwicklung lassen sich dadurch deutlich minimieren.

Die Gestaltung der Produktarchitektur wird unterstützt durch sich ergänzende Methodenbausteine, die den Anwender schrittweise durch den Gestaltungsprozess führen (s. Abb. 4.21).

Unterstützt wird die Methodik durch die flexible Softwarelösung METUS® zur Gestaltung und Visualisierung von Produktarchitekturen. Per Drag & Drop werden die Elemente schnell verknüpft und geändert, mit zusätzlichen Informationen angereichert und in übersichtlichen Grafiken visualisiert (s. Abb. 4.22).

---

Die softwaregestützte Modellierung der Produktarchitektur ist zugleich die Voraussetzung für die Weiterverwendung in den konstruktionsbegleitenden Systemen der nachgelagerten Entwicklungsschritte, insbesondere CAD (Computer Aided Design) und PDM-Systemen (Product Data Management).

---

## Literatur

### Abschnitt 4.1

- Hubka V (1984) Theorie technischer Systeme. Springer, Berlin  
Hubka V, Eder WE (1988) Theory of technical systems. Springer, Berlin  
Hubka V, Eder WE (1992) Einführung in die Konstruktionswissenschaft – Übersicht, Modell, Anleitungen. Springer, Berlin

### Abschnitt 4.2

- Rodenacker G (1991) Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher, Bd 27. Springer, Berlin (1970, 2. Aufl. 1976, 3. Aufl. 1984, 4. Aufl.)

### Abschnitt 4.3

- Birkhofer H, Kloberdanz H, Berger B (2000) Produktentwicklung 1; Skript zur Vorlesung Wintersemester 2000/2001. Darmstadt  
Brezing AN (2005) Planung innovativer Produkte unter Nutzung von Design- und Ingenieurtdienstleistungen. Diss. RWTH Aachen, Shaker  
DIN EN 1325-1 (1996) Value Management, Wertanalyse, Funktionenanalyse, Wörterbuch – Teil 1: Wertanalyse und Funktionenanalyse. Deutsche Fassung EN 1325-1  
Ehrlenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung, 4. Aufl. Hanser, München  
Hansen F (1966) Konstruktionssystematik, 2. Aufl. VEB Verlag Technik, Berlin  
Hubka V (1976) Theorie der Konstruktionsprozesse. Analyse der Konstruktionstätigkeit. Springer, Berlin  
Kartika SI (2010) Methodik zur Analyse des Baukastenpotenzials bei bestehender Produktrvielfalt. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Bd 09. Shaker, Aachen  
Krumhauer P (1974) Rechnerunterstützung für die Konzeptphase der Konstruktion. Diss. TU Berlin 1974 D83  
Rodenacker G (1991) Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher, Bd 27. Springer, Berlin (1970, 2. Aufl. 1976, 3. Aufl. 1984, 4. Aufl.)

### Abschnitt 4.4

- Hansen F (1966) Konstruktionssystematik, 2. Aufl. VEB Verlag Technik, Berlin  
Hubka V (1984) Theorie technischer Systeme. Springer, Berlin

- Hubka V, Eder WE (1988) Theory of technical systems. Springer, Berlin
- Hubka V, Eder WE (1992) Einführung in die Konstruktionswissenschaft – Übersicht, Modell, Anleitungen. Springer, Berlin
- Koller R (1994) Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Springer, Berlin (1976, 2. Aufl. 1985 – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte, 3. Aufl.)
- Miller GA, Galanter E, Pribram K (1960) Plans and the structure of behavior. Holt, Rinehardt & Winston, New York
- Rodenacker G (1991) Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher, Bd 27. Springer, Berlin (1970, 2. Aufl. 1976, 3. Aufl. 1984, 4. Aufl.)
- VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1 (1977) Konstruktionsmethodik – Konzipieren technischer Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI-Richtlinie 2242 Blatt 1 (1986) Ergonomiegerechtes Konstruieren. VDI-Verlag, Düsseldorf

## Abschnitt 4.5

- Clark KB, Fujimoto T (1990) The power of product integrity. Harv Bus Rev 68(Nov/Dez):107–118
- Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U (2007) Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 6. Aufl. Springer, Berlin
- Göpfert J (1998) Modularer Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Gabler, Wiesbaden
- Göpfert J, Steinbrecher M (2000) Modularer Produktentwicklung leistet mehr. Harv Bus Manag 22(3):20–30
- Grady JO (1993) System requirements analysis. McGraw-Hill, New York
- Pahl G, Beitz W (1993) Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung, 3. Aufl. Springer, Berlin
- Pine BJ II (1993) Mass customization – the new frontier in business competition. Harvard Business School Press, Boston
- Rapp T (1999) Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen. DUV Gabler, Wiesbaden
- Schillings D, Wach JJ, Tretow G, Göpfert J (2008) Mehr Effizienz im Engineering. Praxisbewährte Instrumente für ein kontinuierliches F & E-Controlling und Implementierung eines Programms zur Performance Steigerung. Books on Demand GmbH
- Ulrich K (1995) The role of product architecture in the manufacturing firm. Res Policy 24:419–440
- Ulrich K, Seering W (1990) Function sharing in mechanical design. Des Stud 11(4):223–234
- Ye N, Urzi DA (1996) Heuristic rules and strategies of assembly planning: experiment and implications in the design of assembly decision support system. Int J Prod Res 34(8):2211–2228

---

## Teil II

# Lösungsfindung

<b>5 Einleitung . . . . .</b>	<b>283</b>
5.1 Grundsätzliche Arbeitstechniken beim Entwickeln und Konstruieren (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	284
5.1.1 Die opportunistische Arbeitstechnik . . . . .	284
5.1.2 Die systematisch/methodische Arbeitstechnik . . . . .	285
5.1.3 Weitere methodische Arbeitsschritte . . . . .	286
Literatur . . . . .	290
<b>6 Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses . . . . .</b>	<b>291</b>
6.1 Produktplanung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	292
6.1.1 Neuheitsgrad eines Produkts (Innovation) . . . . .	293
6.1.2 Produktlebenszyklus . . . . .	296
6.1.3 Unternehmensziele und ihre Auswirkungen . . . . .	300
6.1.4 Durchführung der Produktplanung . . . . .	301
6.2 Methodisches Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung (Arun Nagarajah) . . . . .	319
6.2.1 Einleitung . . . . .	319
6.2.2 Aufbau und Erstellung der Anforderungsliste . . . . .	321
6.2.3 Ermitteln der Anforderungen und Erstellen der Anforderungsliste .	325
6.2.4 Weitere Aspekte und Praxis . . . . .	339
6.3 Erstellung eines Konzepts für das Produkt (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	341
6.3.1 Funktionale Beschreibung des Produkts . . . . .	344
6.3.2 Das Wirkkonzept . . . . .	347
6.3.3 Erstellen des Wirkkonzepts . . . . .	348
6.4 Auswahl- und Bewertungsmethoden (Sandro Wartzack) . . . . .	380
6.4.1 Einfache Bewertungsverfahren zur Vorauswahl von Lösungsvarianten . . . . .	386

6.4.2	Aufwändige Bewertungsverfahren zur Lösung von Entscheidungsaufgaben .....	390
6.4.3	Komplexe Bewertungsverfahren zur Entscheidungsfindung .....	395
6.4.4	Rechnerunterstützung.....	398
6.4.5	Überprüfung der Bewertungsergebnisse.....	401
	Literatur .....	404
<b>7</b>	<b>Hilfsmittel für die Entwicklung und Konstruktion</b> .....	411
7.1	Konventionelle Hilfsmittel (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	412
7.2	Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung und -konstruktion (Gamal Lashin) .....	413
7.2.1	Grundlagen der Rechnerunterstützung .....	413
7.2.2	CAD-Systeme .....	416
7.2.3	Systeme für Berechnung und Simulation (CAE) .....	437
7.2.4	Produktdatenmanagement (PDM) .....	443
7.2.5	Enterprise Resource Planning (ERP) .....	451
	Literatur .....	455

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess kann als ein allgemeiner Lösungsprozess beschrieben werden, wie er in Abb. 5.1 dargestellt ist. Dieses grundsätzliche Vorgehen gilt nicht nur für den gesamten Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, sondern ebenso für jeden seiner einzelnen Schritte. Sinnvollerweise wird dabei vom qualitativen zum quantitativen vorgegangen. Bei näherer Betrachtung von Abb. 5.1 wird auch die grundsätzliche Teilung des Vorgehens deutlich. Im ersten Abschnitt geht es um die Klärung „WAS“ soll das Produkt können und im zweiten darum, „WIE“ die Lösung konkret aussehen soll. Diese Trennung ist insbesondere deshalb sinnvoll, da in der industriellen Praxis die für ein Unternehmen folgenreichsten Fehler meistens durch nicht eindeutige Klärung der Aufgabenstellung, also des ungeklärten „WAS“, hervorgerufen werden.

Das grundsätzliche Vorgehen hängt im Wesentlichen von dem Neuheitsgrad und den vorhandenen Erfahrungen mit der Aufgabenstellung ab. Bei bekannten Aufgaben wird eher das lösungsorientierte Vorgehen zum Einsatz kommen. Neue Aufgaben werden typischerweise mit Hilfe des problemorientierten Vorgehens gelöst. Auf beide Vorgehensweisen wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen. Bei beiden wird aber, je nach Typ des Bearbeiters, eine opportunistische bzw. eine systematische/methodische Arbeitstechnik angewendet.

---

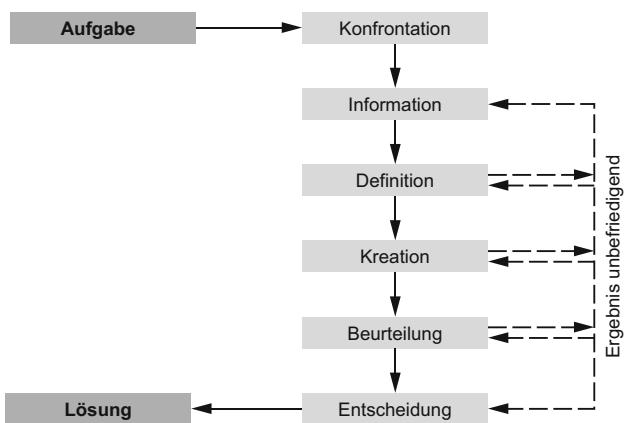
J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

**Abb. 5.1** Allgemeiner Lösungsprozess



## 5.1 Grundsätzliche Arbeitstechniken beim Entwickeln und Konstruieren (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

### 5.1.1 Die opportunistische Arbeitstechnik

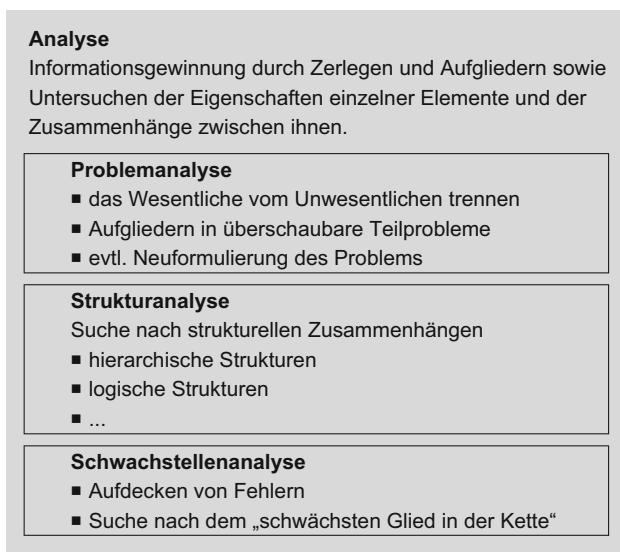
Die opportunistische Arbeitstechnik besteht darin entweder auf Basis der vorhandenen Erfahrungen gewonnene Lösungsmuster (Alexander 1997) zu erkennen oder aufgrund einer nicht näher spezifizierten Intuition direkt Teillösungen angeben zu können (Lemburg 2009). Dieses Vorgehen basiert also auf einer durch Erfahrungen gestützten Kreativität und darf nicht gleichgesetzt werden mit spontanen Einfällen. Die so gefundenen Lösungen stammen entweder aus dem eigenen Unternehmen oder sind Lösungen von Wettbewerbern.

Dem Vorteil dieser Arbeitstechnik, bei Aufgabenstellungen mit eingeschränkter Komplexität sehr schnell und effektiv eine mögliche Lösung zu finden, stehen aber auch Nachteile gegenüber:

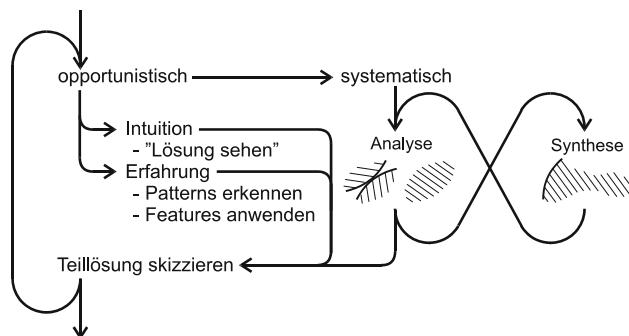
- Eine innovative Lösung wird nicht gefunden, da im vorhandenen Lösungsraum, also im eigenen Unternehmen oder bei marktgängigen Lösungen, gesucht wird,
- mangelnde Berücksichtigung der unterschiedlichen Anwendungsbedingungen der Lösung bei der neuen und alten Aufgabe,
- eine nicht optimale Lösung wird zu lange verfolgt und
- es wird keine Lösung gefunden, weil auf dem gefragten Aufgabengebiet keine Erfahrungen vorliegen.

Aus den genannten Gründen ist es immer sinnvoll und meistens auch erforderlich, einen Wechsel der Arbeitstechniken zwischen dem opportunistischen und einem systematischen Vorgehen vorzunehmen.

**Abb. 5.2** Typische Analysen im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess



**Abb. 5.3** Wechsel der Arbeitstechniken (in Anlehnung an Lemburg 2009)



### 5.1.2 Die systematisch/methodische Arbeitstechnik

Im Gegensatz zur opportunistischen Arbeitstechnik, die auf der Nutzung spontaner Lösungsideen beruht, wird bei der systematisch/methodischen Arbeitstechnik der Wechsel zwischen Arbeitsschritten zur Analyse und Synthese der Aufgabe und Lösung genutzt. Die typischerweise beim Entwickeln und Konstruieren durchzuführenden Analysen sind in Abb. 5.2 dargestellt. Je nachdem, in welcher Phase des PEP man sich befindet, wird entsprechend die Anforderungsliste, das Konzept, die grobe Geometrie der Komponenten usw. synthetisiert, also aus einzelnen Elementen zusammengesetzt.

Wie in Abschn. 5.1.1 dargelegt, sollte die hier vorgestellte Arbeitstechnik grundsätzlich auch zur kritischen Bewertung und zur Lösungserweiterung bzw. Absicherung bei der opportunistischen Arbeitstechnik eingesetzt werden. Damit ergibt sich ein prinzipielles Vorgehen entsprechend Abb. 5.3.

Neben der Analyse als wesentlichem methodischem Arbeitsschritt gibt es noch weitere wiederkehrende Methoden.

### 5.1.3 Weitere methodische Arbeitsschritte

Die im Folgenden dargestellten allgemeinen Methoden sind als weitere Grundlage für methodisches Arbeiten aufzufassen. Von ihnen wird immer wieder Gebrauch gemacht (Holliger 1970). Auch sog. „neue“ Methoden, die unter gewissen Schlagworten angeboten werden, sind oft nur eine Neuverpackung der nachfolgend dargestellten allgemein wiederkehrenden Methoden.

#### 1. Analysieren

Eine *Analyse* ist in ihrem Wesen Informationsgewinnung durch Zerlegen und Aufgliedern sowie durch Untersuchen der Eigenschaften einzelner Elemente und der Zusammenhänge zwischen ihnen. Es geht dabei um Erkennen, Definieren, Strukturieren und Einordnen. Die gewonnenen Informationen werden zu einer Erkenntnis verarbeitet. Zur Vermeidung von Fehlern wurde gefordert, die Aufgabenstellung klar und eindeutig zu formulieren. Dabei ist es wichtig, das vorliegende Problem zu analysieren. *Problemanalyse* heißt, das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen und bei komplexeren Problemstellungen durch Aufgliedern in einzelne, übersehbare Teilprobleme eine diskursive Lösungssuche vorzubereiten. Bereitet die Lösungssuche Schwierigkeiten, so kann durch Neuformulierung des Problems u. U. eine bessere Ausgangsposition geschaffen werden. Die Umformulierung von Aussagen ist oft ein wirksames Hilfsmittel, um neue Ideen oder Aspekte zu gewinnen. Die Erfahrung zeigt, dass eine sorgfältige Problemanalyse und -formulierung zu den wichtigsten Schritten methodischen Arbeitens gehören.

Hilfreich bei der Lösung einer Aufgabe ist eine *Strukturanalyse*, d. h. das Suchen nach strukturellen Zusammenhängen, z. B. nach hierarchischen Strukturen oder logischen Zusammenhängen. Allgemein kann man dieses methodische Vorgehen dahingehend charakterisieren, dass es bemüht ist, über strukturelle Recherchen, z. B. mit Hilfe von Analogiebetrachtungen (vgl. Abschn. 6.3.3), Gemeinsamkeiten oder auch Wiederholungen zwischen unterschiedlichen Systemen aufzuzeigen.

Ein weiteres wichtiges Hilfsmittel ist die *Schwachstellenanalyse*. Dieser methodische Ansatz geht davon aus, dass jedes System, also auch ein technisches Produkt, Schwachstellen und Fehler besitzt, die durch Unwissenheit und Denkfehler, durch Störgrößen und Grenzen, die im physikalischen Geschehen selbst liegen, sowie durch fertigungsbedingte Fehler hervorgerufen werden. Im Zuge einer Systementwicklung ist es wichtig, ein Konzept oder Entwurf auf seine Schwachstellen hin zu analysieren und nach Verbesserungen zu suchen. Zum Erkennen solcher Schwachstellen haben sich Auswahl- und Bewertungsverfahren (vgl. Abschn. 6.4) und Fehlererkennungsmethoden bewährt. Die Erfahrung zeigt, dass nicht nur eine Detailverbesserung bei Beibehaltung des gewählten Lösungsprinzips möglich wird, sondern häufig auch die Anregung zu einem neuen Lösungsprinzip ausgelöst wird.

## 2. Abstrahieren

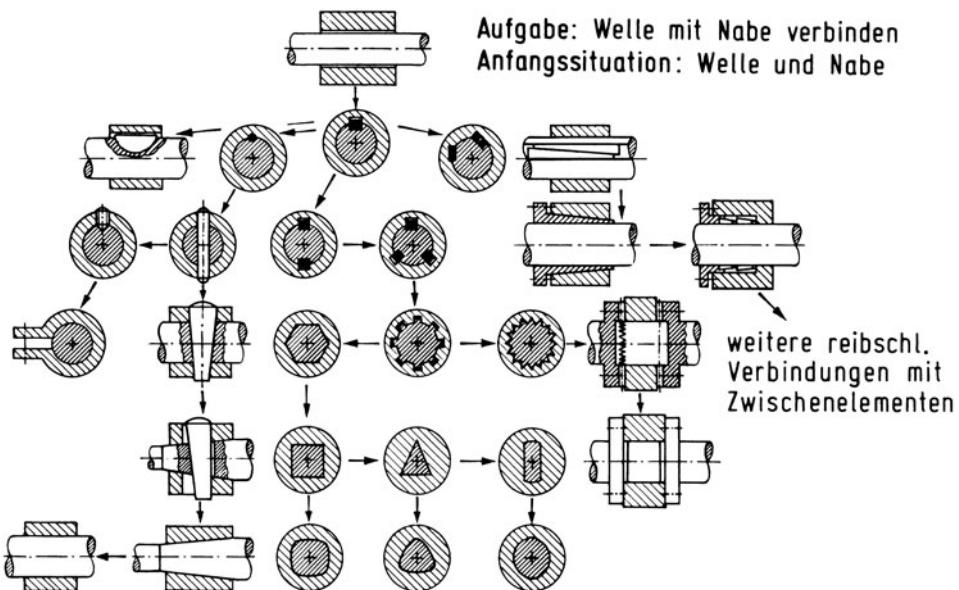
Ausgehend von einer Analyse ist es in der Regel möglich, aufgrund erkannter Merkmale durch Abstraktion (Verallgemeinern, Vereinfachen durch Verzicht auf Einzelheiten), einen übergeordneten Zusammenhang zu finden, der allgemeiner und damit weitreichender ist. Ein solches Vorgehen wirkt zum einen Komplexitätsreduzierend und lässt zum anderen wesentliche Merkmale hervortreten. Letztere wiederum geben Anlass, nach anderen, die erkannten Merkmale aber enthaltenden Lösungen zu suchen und diese dann zu finden. Gleichzeitig entsteht beim Bearbeiter eine gedankliche Struktur, in die er unterschiedliche Erscheinungsformen leichter abrufbar einordnen kann. Die Abstraktion unterstützt also gleichermaßen kreative als auch systematisierende Denkvorgänge. Mit ihrer Hilfe ist es auch eher möglich, ein Problem so zu definieren, dass es von Zufälligkeiten der Entstehung oder Anwendung befreit wird und damit in eine allgemeingültige Lösung überführt werden kann.

## 3. Synthese

Die *Synthese* ist in ihrem Wesenskern Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen, durch Verknüpfen von Elementen mit insgesamt neuen Wirkungen und das Aufzeigen einer zusammenfassenden Ordnung. Es ist der Vorgang des Suchens und Findens sowie des Zusammensetzens und Kombinierens. Wesentliches Merkmal konstruktiver Tätigkeit ist das Zusammenfügen einzelner Erkenntnisse oder Teillösungen zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem, d. h. das Verknüpfen von Einzelheiten zu einer Einheit. Bei diesem *Syntheseprozess* werden auch die durch Analysen gefundenen Informationen verarbeitet. Generell ist bei einer Synthese das sog. *Ganzheits- oder Systemdenken* zu empfehlen. Es bedeutet, dass bei der Bearbeitung einzelner Teilaufgaben oder bei zeitlich aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten immer die Gegebenheiten der Gesamtaufgabe oder des Gesamtablaufs betrachtet werden müssen, will man nicht Gefahr laufen, trotz Optimierung einzelner Baugruppen oder Teilschritte, keine günstige Gesamtlösung zu erreichen. Aus dieser Erkenntnis hat sich auch die interdisziplinäre Betrachtungsweise der Methode „Wertanalyse“ entwickelt, die nach einer Problem- und Strukturanalyse durch frühzeitiges Hinzuziehen aller Betriebsbereiche ein ganzheitliches Systemdenken erzwingt. Ein weiteres Beispiel ist die Durchführung von Großprojekten, insbesondere auch ihre terminliche Abwicklung mit Hilfe der Netzplantechnik. Die gesamte Systemtechnik mit ihren Methoden beruht sehr stark auf diesem Ganzheitsdenken. Besonders bei der Bewertung mehrerer Lösungsvorschläge ist eine ganzheitliche Betrachtungsweise, die sich z. B. in der Wahl der Bewertungskriterien ausdrückt, wichtig, da der Wert einer Lösung nur bei Berücksichtigung aller Bedingungen, Wünsche und Erwartungen richtig abzuschätzen ist.

## 4. Methode des gezielten Fragens

Es kann häufig sehr nützlich sein, Fragen zu stellen. Durch selbst gestellte oder vorgelegte Fragen werden zum einen der Denkprozess und die Intuition angeregt, zum anderen fördert ein Fragenkatalog auch das diskursive Vorgehen. „Fragen stellen“ gehört mit zu den wichtigsten methodischen Hilfsmitteln. Das drückt sich auch dadurch aus, dass die Mehrzahl der Autoren zu den einzelnen Arbeitsschritten Fragelisten vor-



**Abb. 5.4** Entwicklung von Welle-Nabe-Verbindungen nach der Methode des Vorwärtsschreitens

schlagen, mit denen ihre Durchführung erleichtert werden soll. Sie liegen in der Praxis für verschiedene Arbeitsschritte, z. B. als Checklisten, vor.

### 5. Methode der Negation und Neukonzeption

Die Methode der *bewussten Negation* geht von einer bekannten Lösung aus, gliedert sie in einzelne Teile bzw. beschreibt sie durch einzelne Aussagen oder Begriffe und negiert diese Aussagen der Reihe nach für sich oder in Gruppen. Aus dieser bewussten Umkehrung können neue Lösungsmöglichkeiten entstehen. Beispielsweise wird man bei einem „rotierenden“ Konstruktionselement auch eine „stehende“ Konzeption verfolgen. Auch das Weglassen eines Elements kann eine Negation bedeuten. Dieses Vorgehen wird auch als „methodisches Zweifeln“ bezeichnet (Holliger 1970).

### 6. Methode des Vorwärtsschreitens

Ausgehend von einem ersten Lösungsansatz versucht man, alle nur denkbaren oder möglichst viele Wege einzuschlagen, die von diesem Ansatz bzw. von dieser Anfangssituation wegführen und weitere Lösungen liefern. Man spricht auch von einem bewussten Auseinanderlaufenlassen der Gedanken (divergentes Denken bzw. Vorgehen). Divergentes Denken bedeutet jedoch nicht immer ein systematisches Variieren, sondern häufig auch ein zunächst unsystematisches Auseinanderlaufen der Gedanken. Die Lösungssuche durch Vorwärtsschreiten soll beispielsweise mit Abb. 5.4 bei der Entwicklung von Wellen-Nabe-Verbindungen gezeigt werden. Die eingezeichneten Pfeile deuten die Denkrichtungen an.

Durch Nutzung systematischer Merkmale (s. Abb. 6.44) kann ein solcher Denkprozess bewusst unterstützt werden, indem die Variation enger in Anlehnung solcher Merkmale erfolgt (s. Abb. 6.47). Vielfach, insbesondere bei gut strukturierten Vorstellungen, erfolgt eine unbewusste, dann aber meist nicht vollständige Nutzung der Merkmale (s. Abb. 5.4).

## 7. Methode des Rückwärtsschreitens

Bei dieser Methode geht man nicht von der Anfangssituation des Problems, sondern von seiner Zielsituation aus. Man betrachtet hier das Entwicklungsziel und beginnt, rückwärtsschreitend alle nur denkbaren oder möglichst viele Wege zu entwickeln, die in dieses Ziel einmünden. Man spricht hier auch von einer Einengung oder von einem bewussten Zusammenführen der Gedanken (konvergentes Denken), da nur solche Gedanken verfolgt werden, die zum Ziel führen bzw. im Ziel zusammenlaufen. Dieses Vorgehen ist typisch beim Erstellen von Arbeitsplänen und Fertigungssystemen zur Bearbeitung eines fest vorgegebenen Werkstücks (Zielsituation).

Dieser Methode kann auch das Vorgehen von Nadler (Nadler 1967) zugeordnet werden, der zur Lösungssuche vorschlägt, ein ideales System aufzubauen, das die gestellten Anforderungen vollkommen erfüllt. Es dient dann als Richtschnur für die Entwicklung des geforderten Systems. Dabei wird ein Idealsystem nicht im eigentlichen Sinne entworfen, vielmehr existiert es als Bedingung, so z. B. ideale Umgebungsverhältnisse ohne irgendwelche Störeinflüsse. Im Folgenden wird dann schrittweise überprüft, welche Zugeständnisse gemacht werden müssen, um das theoretische Idealsystem in ein technologisch realisierbares System und schließlich in ein die konkreten Randbedingungen erfüllendes System zu überführen. Problematisch bei diesem Verfahren ist allerdings die Festlegung des „Ideals“, denn nicht für alle Funktionen, Systemelemente oder Baugruppen ist von vornherein der Idealzustand eindeutig erkennbar, insbesondere nicht, wenn sie in einem komplexen System verknüpft sind.

## 8. Methode der Faktorisierung

Mit Faktorisierung wird die Auflösung (das Herunterbrechen) eines komplexeren Zusammenhangs oder Systems in überschaubare, weniger komplexe, dafür aber definierbar einzelne Elemente (Faktoren) verstanden, die das Geschehen bestimmen. Das Gesamtproblem wird in abtrennbare, d. h. in gewissen Grenzen unabhängige, Teilprobleme oder die Gesamtaufgabe in Teilaufgaben gegliedert, die für sich zunächst gesondert betrachtet und gelöst werden können. Dabei wird die Einbindung in den Gesamtzusammenhang selbstverständlich im Auge behalten. Durch diese Entflechtung sind die Teilprobleme in der Regel leichter lösbar. Gleichzeitig wird auch ihre Bedeutung und Reichweite im Gesamtzusammenhang deutlicher, wodurch eine Prioritätensetzung erleichtert wird. Das methodische Vorgehen nützt dies beim Gliedern in Teifunktionen und beim Aufstellen der Funktionsstruktur, der Suche nach Wirkprinzipien für Teifunktionen und bei der Planung der Arbeitsschritte beim Konzipieren und Entwerfen.

## 9. Methode des Systematisierens

Beim Vorliegen von kennzeichnenden Merkmalen besteht die Möglichkeit, durch *systematische Variation* ein mehr oder weniger vollständiges Lösungsfeld zu erarbeiten. Charakteristisch ist das Aufstellen einer verallgemeinernden Ordnung, wodurch erst eine vollständige Lösungsübersicht erreicht wird. Unterstützt wird dieses Vorgehen durch eine schematisierte Darstellung von Merkmalen und Lösungen. Auch vom arbeitswissenschaftlichen Standpunkt ist festzustellen, dass dem Menschen das Finden von Lösungen durch Aufbau und Ergänzung einer Ordnung leichter fällt. Praktisch alle Autoren zählen ein systematisches Variieren zu den wichtigsten methodischen Hilfsmitteln.

## 10. Arbeitsteilung und Zusammenarbeit

Eine wesentliche arbeitswissenschaftliche Erkenntnis ist die Notwendigkeit einer Arbeitsteilung bei der Bearbeitung umfangreicher und komplexer Aufgabenstellungen. Eine solche Arbeitsteilung wird heute durch die ständig fortschreitende Spezialisierung immer notwendiger, sie ist aber auch durch die geforderten kurzen Bearbeitungszeiten erforderlich. Arbeitsteilung bedeutet aber auch interdisziplinäre Zusammenarbeit, wozu organisatorische und personelle Voraussetzungen, unter anderem die Aufgeschlossenheit des Einzelnen gegenüber Anderen, gegeben sein müssen. Es sei aber betont, dass interdisziplinäre Zusammenarbeit und Teamarbeit umso mehr die Schaffung klarer Verantwortlichkeiten erfordern. So ist beispielsweise in der Industrie die Stellung des sog. Produktmanagers entstanden, der über die Abteilungsgrenzen hinweg die alleinige Verantwortung für die Entwicklung eines Produkts trägt. Methodisches Vorgehen, gepaart mit Methoden, die gruppodynamische Effekte nutzen, wie z. B. Brainstorming, Galeriemethode (vgl. Abschn. 6.3.3) und Beurteilungen durch eine Gruppe (vgl. Abschn. 6.4) helfen, durch Arbeitsteilung entstandene Informationsdefizite abzubauen und eine gegenseitige Anregung bei der Lösungssuche zu verstärken.

---

## Literatur

- Alexander C (1997) A pattern language. Oxford University Press, New York
- Holliger H (1970) Morphologie – Idee und Grundlage einer interdisziplinären Methodenlehre. Kommunikation, Bd 1, V1. Schnelle, Quickborn
- Lemburg JP (2009) Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese. Dissertation an der RWTH Aachen, in Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Bd 06
- Nadler G (1967) Arbeitsgestaltung – zukunftsbesusst. Hanser, München (1969 Amerikanische Originalausgabe: Work Systems Design: The ideals Concept. Homewood, Illinois: Richard D. Irwin Inc.)

---

## Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses

Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Arun Nagarajah, Gerhard Pahl,  
Wolfgang Beitz<sup>†</sup> und Sandro Wartzack

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Abschnitt erläutert, gliedert sich der Produktentstehungsprozess (PEP) aus Sicht der Produktentwicklung und -konstruktion in drei Hauptschritte:

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B,  
52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

A. Nagarajah

Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B,  
52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: nagarajah@ikt.rwth-aachen.de

G. Pahl

Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

W. Beitz<sup>†</sup>

Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

S. Wartzack

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,  
Martensstraße 9, 91058 Erlangen, Deutschland  
E-Mail: wartzack@mfk.uni-erlangen.de

1. Die Festlegung des *WAS*: Damit ist die Spezifikation und Beschreibung der Entwicklungs- und Konstruktionsaufgabe gemeint, letztlich also die Beschreibung dessen, welche Funktionen das Produkt erfüllen soll, was es leisten soll, wie und wo es hergestellt wird und wie und wo es eingesetzt werden soll.
2. Die Festlegung des *WIE*: Hierbei geht es um die eigentliche Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit. Es werden entsprechend die zu nutzenden physikalischen Effekte, Materialien, Bauteile und Baugruppen und deren Zusammenspiel bestimmt. Dies alles erfolgt unter der Maßgabe, dass das Produkt das im ersten Abschnitt des PEP definierte „*WAS*“ erfüllt.
3. Die systematische und methodische Festlegung, *WOMIT* die Lösung realisiert werden soll: Hierbei geht es um die Makro- und Mikrogestaltung des Produkts und all seiner Einzelteile.

Das Vorgehen, wie die Festlegung, *WAS* ein Produkt können soll, welchen Einsatzzweck und welche Leistung es hat, wo und wie es eingesetzt werden soll, hängt im Wesentlichen vom Neuheitsgrad des Produkts ab. Der überwiegende Teil der heutigen Produkte beruht auf vorhandenen Produktideen. Die Produkteigenschaften sind damit zum überwiegenden Teil bestimmt. Abweichungen ergeben sich aus Leistungs- und/oder Baugrößenvarianten. Daneben gibt es aber eine Reihe von Branchen und Produktarten, die, z. B. aufgrund der Marktsituation, ständige Neuerungen erfordern. In diesen Fällen kann dann gar nicht oder nur sehr eingeschränkt auf vorhandene Produkte zurückgegriffen werden. Neue Produktideen sind erforderlich und Produkte müssen neu geplant werden. Auf die Arbeitsschritte der Produktplanung wird im folgenden Kapitel eingegangen.

---

## 6.1 Produktplanung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben ergeben sich zunächst aus direkten Kundenaufträgen, bei denen das anbietende Unternehmen den abnehmenden Kunden kennt. Dieses sog. Business-to-Business-Geschäft (Kleinaltenkamp et al. 1996; Kramer und Kramer 1997) ist typisch für den Spezialmaschinenbau, den Anlagenbau, aber auch für Zulieferer-Unternehmen. Bei solchen Aufträgen geht der Trend von einer Kundenorientierung zu einer Kundenintegration (Kleinaltenkamp et al. 1996), was naturgemäß auch Auswirkungen auf die Arbeit der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung hat (Beitz 1996).

Aufgabenstellungen ergeben sich aber nicht allein durch Kundenaufträge, sondern mehr und mehr, besonders bei Neukonstruktionen, durch einen von der Unternehmensleitung vorgenommenen Planungsvorgang, der in einer besonderen Gruppe außerhalb des Konstruktionsbereichs durchgeführt wird. Der Konstruktionsbereich ist nicht mehr frei, er muss die Planungsvorstellungen anderer berücksichtigen. Andererseits kann der Konstrukteur wegen seiner besonderen Kenntnisse zur Produktgestaltung aber auch wertvolle Hilfestellung für mittel- und langfristige Planungen von Produkten geben. Die Konstruktionsleitung muss deshalb nicht nur Kontakt mit der Fertigung, sondern auch mit der Produktplanung halten.

Ein Planungsprozess kann auch von externen Stellen, z. B. Kunde, Behörde, Planungsbüro usw., durchgeführt worden sein.

Bei Neukonstruktionen beginnt der Konstruktionsprozess mit dem Konzipieren auf der Grundlage einer Anforderungsliste. Ist diese, meistens in Form einer vorläufigen Anforderungsliste, das Ergebnis einer vorgeschalteten Produktplanung, so ist es für den Konstrukteur wichtig, wesentliche Gesichtspunkte und Arbeitsschritte der Produktplanung zu kennen, um die Entstehung des Anforderungsspektrums besser verstehen und ggf. ergänzen zu können. Wurde eine institutionalisierte Produktplanung dagegen nicht vorgeschaltet, kann der Konstrukteur mit seinen Kenntnissen über Produktplanung entsprechende Schritte selbst veranlassen oder, wenn auch nur in einem vereinfachten Vorgehen, selbst durchführen.

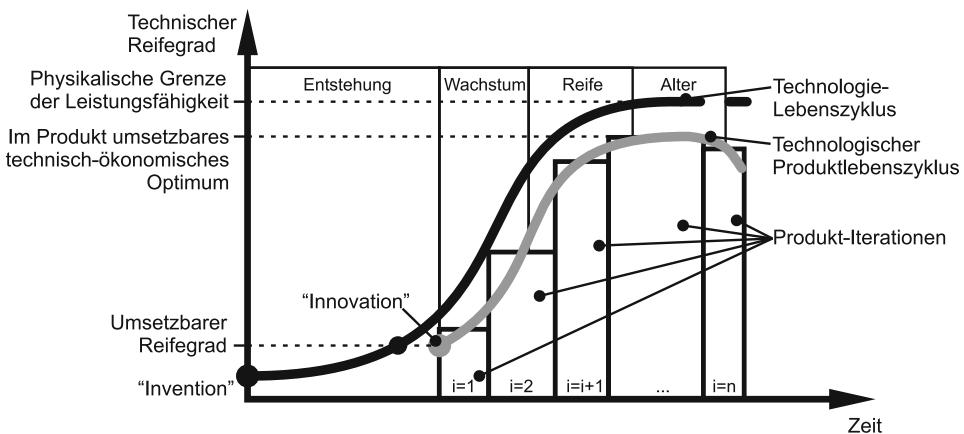
### 6.1.1 Neuheitsgrad eines Produkts (Innovation)

Wie bereits eingangs dieses Abschnitts erläutert, haben die Aufgaben eines Entwicklers oder Konstrukteurs unterschiedliche Neuheitsgrade. Der überwiegende Teil der auszuführenden Konstruktionen besteht in einer Anpassungs- und Variantenkonstruktion. Diese sind nicht gleichzusetzen mit geringeren Ansprüchen an den Konstrukteur. Im Zusammenhang mit der Produktplanung ist eine Differenzierung zur Neukonstruktion interessant:

- *Neukonstruktion*: Neue Aufgaben und Probleme werden gelöst oder mit neuen oder Neukombinationen bekannter Lösungsprinzipien erfüllt.
- *Anpassungskonstruktion*: Das Lösungsprinzip bleibt erhalten, lediglich die Gestaltung wird an neue Randbedingungen angepasst.
- *Variantenkonstruktion*: Innerhalb vorgedachter Grenzen werden die Größe und/oder Anordnung von Teilen und Baugruppen variiert, typisch bei Baureihen/Baukästen.
- *Wiederholkonstruktion*: Neuer Fertigungsanlauf für ein bereits früher konstruiertes und gefertigtes Produkt. Die Verfügbarkeit von Bauteilen und Material muss geprüft werden.

Während diese begriffliche Abgrenzung bzw. die entsprechende Abstufung von Neuheitsgraden für den Konstrukteur ausreichen mag, hat sich im Bereich der interdisziplinären Produktplanung mit einem Fokus auf die wirtschaftliche Verwertbarkeit die betriebswirtschaftliche Terminologie der Innovation durchgesetzt, die auf den österreichischen Ökonomen Joseph Alois Schumpeter zurückgeht. Die Fragen, wie eine Innovation definitorisch abzugrenzen ist, anhand welcher Kriterien ein *Innovationsgrad* zu bestimmen ist und welche Relevanz dieser für den Markterfolg eines Neuprodukts hat, sind Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen.

In der Tat erscheint es angemessen, die Thematik des Innovationsgrades im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertbarkeit zu betrachten; schließlich ist der Gewinn das Hauptziel jedes Wirtschaftsunternehmens. In Bezug auf die betroffenen Prozesse zur Umsetzung einer Produktinnovation innerhalb des Unternehmens, man bedenke alleine den Umgang



**Abb. 6.1** Invention und Innovation als Anfangspunkte eines Technologie-Lebenszyklus und eines technologischen Produktlebenszyklus (in Anlehnung an Brezing 2005)

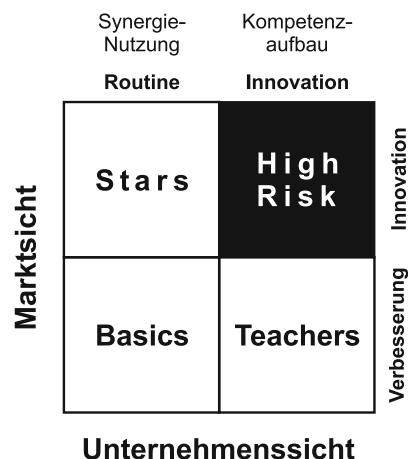
mit technischen Unsicherheiten, spielen technologische Aspekte jedoch in jedem Fall eine wesentliche Rolle. Der Innovationsgrad ist also eine Größe, in die zahlreiche Faktoren hineinspielen. Hauschildt gliedert diese in vier gemeinsam zu betrachtende Dimensionen (Hauschildt 2004):

- inhaltlich (Gegenstand, Art und Grad der Innovation),
- subjektiv (Beurteilende Instanz),
- prozessual (Innovationsprozess, welche Arbeitsschritte sind diesem zuzuteilen) und
- normativ (Erfolg einer Innovation).

Technisch relevant ist die erste Dimension. Hier sind die Invention und die Innovation von einander abzugrenzen. Die *Invention* (Erfindung) ist die „erstmalige technische Umsetzung als auch die neue Kombination bestehender wissenschaftlicher Erkenntnisse“ (Specht et al. 2002) und steht damit „am Anfang eines der beiden Prozesse Technologieentstehung oder Technikentstehung“ (Bürgel et al. 1996). Der Begriff der *Innovation* bedeutet das Einführen eines neuen Produkts in den Markt, wobei die zugehörigen Prozesse der Produktentstehung und des erstmaligen Anfahrens der Produktion im Sinne eines Innovationsprozesses hinzugezählt werden (Specht et al. 2002).

Die Innovation setzt somit eine Invention voraus, die betriebswirtschaftliche Verwertung einer Invention hingegen eine Innovation. Brezing verknüpft diese Definitionen mit dem Modell des Technologie-Lebenszyklus, s. Abb. 6.1, (Brezing 2005). In diesem Modell wird die Invention als Anfangspunkt eines Technologie-Lebenszyklus veranschaulicht. Erreicht die Technologie nach einer anfänglich langsamem Entwicklung einen umsetzbaren Reifegrad, wird diese in einem vermarktbares Produkt umgesetzt, wobei diese Innovation den Anfangspunkt eines technologischen Lebenszyklus eines Produkts bedeutet. Eine technische Weiterentwicklung des Produkts durch eine Umsetzung der Weiterentwicklung der

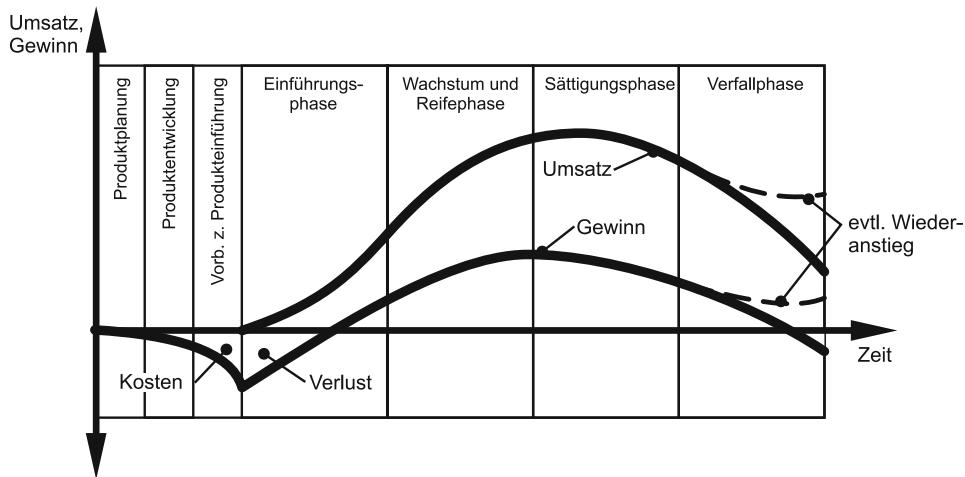
**Abb. 6.2** Innovationsportfolio nach Brandenburg und Spielberg (vgl. Eversheim 2003)



zugrunde liegenden Technologie kann hier nur in diskreten Schritten durch „neue Produkte“ erfolgen. Diese Produkte („Produktiterationen“) sind dann jedoch nicht „innovativ“, sondern Anpassungskonstruktionen im o. g. Sinne; die weiterentwickelte Technologie entspricht einer neuen Randbedingung.

Dass jedes Objekt hinsichtlich seines Innovationsgrades von unterschiedlichen Individuen bzw. Gruppen anders, also subjektiv wahrgenommen wird, ist sowohl für das Managen von unternehmensinternen Prozessen als auch für den Markterfolg eines Neuprodukts relevant. Für ein Unternehmen ist die erstmalige Auseinandersetzung mit neuen Objekten in jedem Fall innovativ und damit vom Tagesgeschäft abzugrenzen, unabhängig davon, ob die Fachwelt außerhalb des Unternehmens das Objekt als „neuartig“ oder „etabliert“ betrachtet. Insofern hat das Management eines Unternehmens ein Objekt hinsichtlich seines Innovationsgrades „unternehmenssubjektiv“ zu beurteilen, um z. B. technischen Risiken angemessen begegnen zu können („prozessuale Dimension“). In Bezug auf den Markterfolg durch die Differenzierung eines Produkts durch seine Neuartigkeit ist hingegen einzig die Wahrnehmung der Käufergruppe relevant; hier muss die unternehmensspezifische Wahrnehmung des Innovationsgrades eines Neuprodukts strikt von der Kundenwahrnehmung abgegrenzt werden. Es können sich jedoch gute Möglichkeiten ergeben, wenn ein Unternehmen eine ihm vertraute Technologie in Form eines neuen Produkts auf einem Markt anbieten kann, dem diese Technologie bisher unbekannt ist. Dieser Sachverhalt wird durch das Innovationsportfolio nach Brandenburg und Spielberg veranschaulicht, s. Abb. 6.2, (zur Portfoliotechnik s. Abschn. 6.1.4).

Eine derartige zweidimensionale Darstellung des Innovationsgrades eines Produkts oder Projekts wird auch in neueren Studien zur Erfolgsfaktorenforschung von Innovationen, wie dem Innovationskompass der TU Berlin, angewendet (Gemünden et al. 2003), wo einem „internen Innovationsgrad“ ein „Marktinnovationsgrad“ gegenübergestellt wird. Ältere Studien zielen mit der Bestimmung eines Innovationsgrades oft auf die Gestaltung des Innovationsprozesses ab, wobei unter Erfolg die Bewältigung von technischen und



**Abb. 6.3** Lebenszyklus eines Produkts nach Kramer 1986

terminlichen Unsicherheiten verstanden wird, nicht aber die Akzeptanz des Produkts durch den Kunden aufgrund der Innovation als Alleinstellungsmerkmal.

## 6.1.2 Produktlebenszyklus

### 1. Begrifflichkeit

Der Begriff des *Lebenszyklus* wird auf verschiedene Aspekte der zeitlichen Entwicklung technischer Produkte angewendet. Inhaltlich voneinander abzugrenzen sind

- der betriebswirtschaftliche Produktlebenszyklus,
- der technologische Produktlebenszyklus und
- der intrinsische Produktlebenszyklus.

**Betriebswirtschaftlicher Produktlebenszyklus** Der betriebswirtschaftliche Lebenszyklus erstreckt sich auf die Dauer der Marktpräsenz eines konkreten Produkts eines bestimmten Herstellers (z. B. das Kfz „Golf 2“ von Volkswagen) und betrachtet die betriebswirtschaftlichen Kenngrößen Umsatz bzw. Gewinn und Verlust. Der typische Verlauf dieser Größen ist mit Nennung der einzelnen Phasen des Zyklus in Abb. 6.3 dargestellt.

Die betriebswirtschaftliche *Zykluszeit* ist je nach Produktart und Branche sehr unterschiedlich. In den letzten Jahren war eine ständige Verkürzung dieser Zeit zu beobachten; ein Trend, der fort dauert. Dies hat Auswirkungen auf die Arbeit der Konstruktions- und Entwicklungsabteilungen, da sich die zugestandenen Bearbeitungszeiten für gleiche oder ähnliche Aufgabeninhalte ebenfalls verkürzen. Deshalb müssen Maßnahmen hinsichtlich der Gestaltung des Produktentwicklungsprozesses und der zu nutzenden Methoden und Werkzeuge, vgl. dieses Kapitel, getroffen werden.

Spätestens nach Erreichen der Sättigungsphase des betriebswirtschaftlichen Produktlebenszyklus sind Maßnahmen zur Wiederbelebung oder zur Schaffung neuer, ablösender Produkte einzuleiten, was eine wichtige Aufgabe der Produktüberwachung ist. Ein weiteres Merkmal in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung des *Marktanteils*.

*Technologischer Produktlebenszyklus* Der technologische Produktlebenszyklus bezieht sich auf den zeitlichen Verlauf der Umsetzung einer technologischen Weiterentwicklung in einem Produkttyp, erstreckt sich also auf eine Reihe zeitlich aufeinanderfolgender Produkte des gleichen Typs (z. B. das Kfz des Typs „Golf“ von Volkswagen, der seit 1974 eine Vielzahl von „Facelifts“ und „Generationswechseln“ erfahren hat).

Betrachtet wird hier die Leistungsfähigkeit im Hinblick auf eine im Produkt verwendete Technologie (z. B. mit der Technologie „Otto-Prozess“ erzielbare Reichweite pro Liter Benzin). Die Leistungsfähigkeit einer Technologie selbst, also der sog. „Technologie-Lebenszyklus“, hat im Allgemeinen den Verlauf einer *S-Kurve* (Altschuller 1998; Specht et al. 2002), wobei sich die Leistungsfähigkeit in der Phase des Alters einem oberen Grenzwert annähert, der durch die zugrunde liegenden physikalischen Gesetze vorgegeben ist, s. Abb. 6.1. Jede Neuauflage eines Produkts (vgl. Abschn. 6.1.1) setzt den aktuellen Stand der Technik und damit die technologische Weiterentwicklung um. Der resultierende Verlauf der Leistungsfähigkeit – also der technologische Produktlebenszyklus – folgt dem Verlauf des Technologie-Lebenszyklus zeitlich versetzt.

Hat eine dem Produkt zugrunde liegende Technologie den Zustand höchster Reife erreicht, kann das entsprechende Produkt im Hinblick auf diese Technologie nicht weiter verbessert werden. Wird eine höhere Leistungsfähigkeit gefordert – etwa vom Markt oder weil das Unternehmen eine Differenzierung des Produkts gegenüber Nachahmern über dessen Leistungsfähigkeit erzielen will – muss die entsprechende Technologie durch eine andere, leistungsfähigere substituiert werden.

*Intrinsischer Produktlebenszyklus* Die allgemeinste und häufigste Anwendung des Begriffs Lebenszyklus in Bezug auf Produkte bezieht sich auf die Abfolge von Situationen, die das eigentliche Produkt von der ersten, dem Produkt zugrunde liegenden Idee, über dessen Entwicklung, Fertigung, Vertrieb, Nutzung usw. bis zu seiner Entsorgung oder sogar darüber hinaus „durchlebt“. Die Relevanz dieser „Produkt-Biographie“ spiegelt sich in zahlreichen Methoden und Arbeitstechniken aus diesem Buch wider, die am Produktlebenszyklus orientiert sind, aber auch durch die zunehmende Berücksichtigung des Produktlebenszyklusmanagements in produzierenden Unternehmen. Wird im Folgenden der Begriff des Produktlebenszyklus ohne nähere Bezeichnung verwendet, ist stets dieser „eigentliche“ intrinsische Produktlebenszyklus gemeint.

## 2. Produktlebenszyklusmanagement (PLM)

Bei allen Aktivitäten zur Produktplanung ist ein strategischer Ansatz notwendig, also u. a. die Fähigkeit die Marktentwicklung richtig zu beurteilen und in den Ansatz zu integrieren,

s. z. B. Abb. 6.10. Das planende Unternehmen muss sich seiner Stärken und Schwächen auf den einzelnen Märkten und gegenüber den Wettbewerbern bewusst sein. Allein schon aus Kostengründen müssen die geplanten Produkte eine möglichst lange Lebensdauer am Markt erreichen. Der hohe Aufwand für eine Neuentwicklung und -konstruktion sowie für die evtl. erforderliche Erstellung neuer Fertigungseinrichtungen ist im Allgemeinen nur vertretbar, wenn entsprechend hohe Stückzahlen des Produkts pro Zeiteinheit längerfristig abgesetzt werden. Dies ist heute nicht ohne Weiteres der Fall. Neben den sich ständig wandelnden Märkten liegt dies auch an dem teilweise sehr hohen Anteil von Elektronik und Software bei fast allen heutigen maschinenbaulichen Erzeugnissen. Der kontinuierliche und rasante Fortschritt auf den Gebieten der Elektronik und Software führt zu einer ständigen Weiterentwicklung dieser Komponenten. Der Bauraum kann verkleinert und der Funktionsumfang erhöht werden. Für den Hersteller solcher mechatronischer Produkte, in denen solche Komponenten integriert sind, hat dies aber sehr häufig große Auswirkungen. Elektronische Bauelemente beispielsweise sind häufig nur über einen sehr begrenzten Zeitraum verfügbar. Ist das weiterentwickelte Bauelement mechanisch oder elektrisch nicht kompatibel, ist eine Umkonstruktion bzw. eine Anpassung der elektrischen Schaltung erforderlich. Die ursprünglich geplanten Stückzahlen eines neuen Produkts werden dann nicht mehr erreicht. Im einfachsten Fall gibt es von dem Produkt eine neue Version. Die Produktdokumentation muss angepasst und u. a. die Frage der Ersatzteilversorgung geklärt werden. In der Folge stimmen auch die ursprünglichen Kostenkalkulationen nicht mehr.

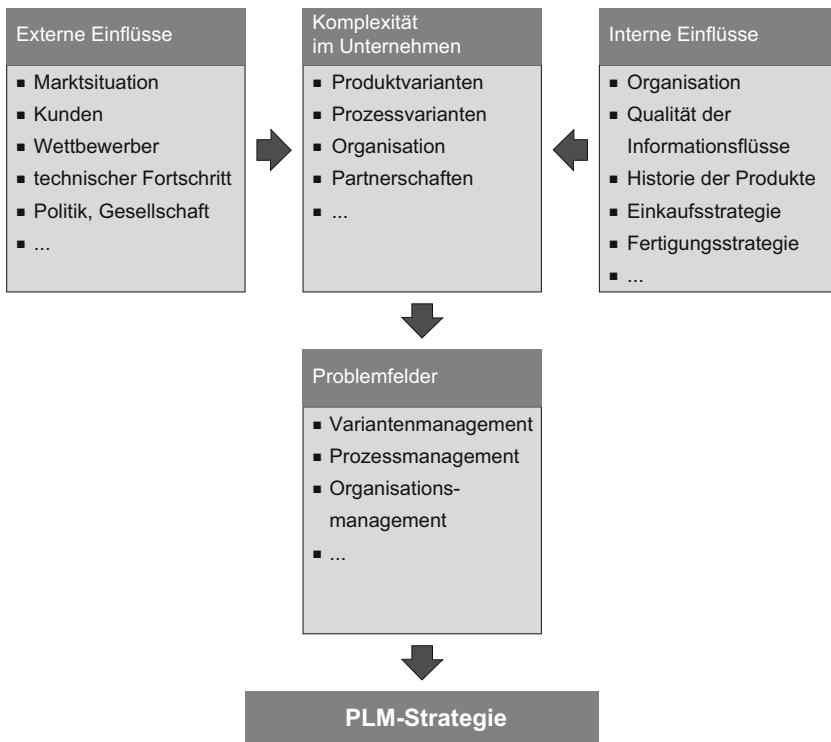
Ein Unternehmen befindet sich ständig in einem Dilemma. Auf der einen Seite gilt es eine hohe Stückzahl mit einer Produktversion zu erzielen. Andererseits erfordert der Markt und die technische Weiterentwicklung von Komponenten dieses Produkt oder seine Komponenten ebenfalls ständig weiter- bzw. neu zu entwickeln, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Die geschilderte Situation führt zu einer ständig steigenden Komplexität im Unternehmen, wenn keine geeigneten Maßnahmen getroffen werden, s. Abb. 6.4.

Einen wirkungsvollen Ausweg aus diesem Dilemma stellt eine *Produktlebenszyklusmanagement-Strategie* für das Unternehmen dar. Im Rahmen dieser Strategie werden Produktentwicklungsstufen und Neuentwicklungen in Abhängigkeit von der ermittelten bzw. vom Unternehmen zu steuernden Marktentwicklung gezielt geplant.

Die wesentliche Überlegung dabei ist, dass Wissen über das eigene Unternehmen, die hergestellten Produkte und den Markt in einen Gesamtansatz zu integrieren (North 2005; Probst et al. 2005). Ziel ist die Reduktion des Ressourceneinsatzes und die Entwicklung von Produkten bzw. Komponenten mit einer möglichst langen und wirtschaftlich tragfähigen Marktpräsenz. Dieser Ansatz wird als *Produktlebenszyklusmanagement*, (*Product Lifecycle Management*, kurz PLM) bezeichnet.

*Product Lifecycle Management (PLM)* stellt eine wissensbasierte Unternehmensstrategie für alle Prozesse und deren Methoden hinsichtlich der Produktentwicklung von der Produktidee bis hin zum Recycling dar (Feldhusen et al. 2006).

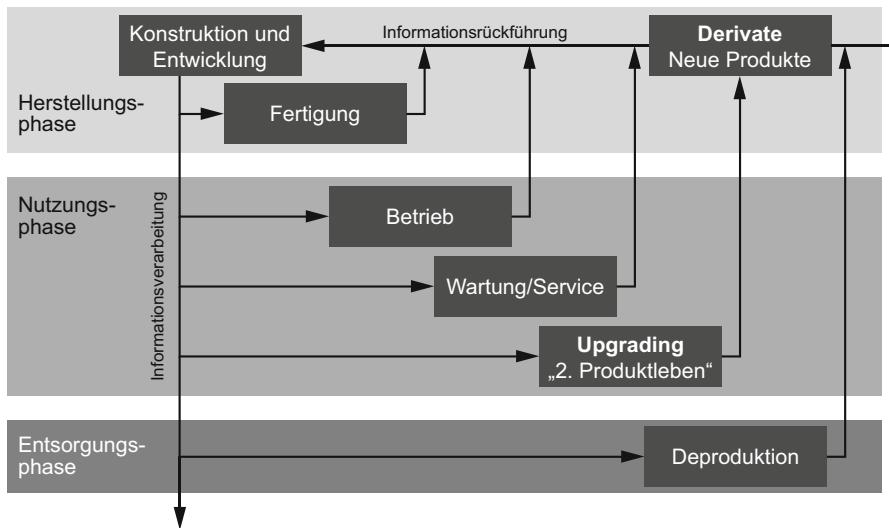
Der PLM-Ansatz beinhaltet also zwei wesentliche Gesichtspunkte. Der erste bezieht sich auf die Steuerung und Regelung der Informationsflüsse über den gesamten Produktlebenszyklus, also von der ersten Idee für ein neues Produkt bis zu seinem Recycling. Dabei



**Abb. 6.4** PLM als Hilfsmittel zur Lösung der Komplexitätsprobleme in Unternehmen

sind nicht nur die unternehmensinternen Informationsflüsse zu berücksichtigen, sondern im Sinne einer *kooperativen Produktentwicklung* auch diejenigen über die Unternehmensgrenzen hinaus. So müssen beispielsweise externe Entwicklungs- oder Produktionspartner gezielt einbezogen werden. Das bedeutet u. a. eine genaue Festlegung der auszutauschenden Inhalte und schließt insbesondere den Schutz des Unternehmenswissens ein. Für diese Aufgabe werden heute rechnerunterstützte Produktdatenmanagementsysteme (PDMS) eingesetzt.

Der zweite Gesichtspunkt des PLM bezieht sich auf das Produkt und seine Gestaltung. Unter Berücksichtigung der ermittelten zukünftigen Marktentwicklung, s. Abschn. 6.1.4, wird das Produkt so aufgebaut, dass beispielsweise eine spätere Funktionsvariation oder Erweiterung möglichst ohne Umkonstruktion umsetzbar ist. Zukünftige Marktbedürfnisse werden also bereits bei der Planung, Gliederung und Konstruktion des Produkts berücksichtigt, ohne dass sie bei der ersten Markteinführung bereits umgesetzt werden. Von entscheidender Bedeutung ist hier die Ausprägung der Komponentenschnittstellen. Hier ist eine Standardisierung der mechanischen, elektrischen und softwaretechnischen Größen zwingend notwendig, um einen späteren Ersatz von Komponenten ohne Probleme zu ermöglichen. Das Produkt beinhaltet also noch Funktions- und/oder Eigenschaftsvorräte, die



**Abb. 6.5** Die Informations- und Wissensflüsse bei der Umsetzung von PLM

bei entsprechendem Bedarf genutzt werden. Solche Produkte können als *Multi-Life-Produkte* bezeichnet werden. Abbildung 6.5 stellt die bei der Umsetzung von PLM auftretenden Informations- und Wissensflüsse im Unternehmen dar.

Allerdings müssen umfangreichere Maßnahmen zur Umsetzung des PLM-Ansatzes getroffen werden. Sie beziehen sich sowohl auf das Produkt sowie auf den gesamten Produktentstehungsprozess als auch auf die eingesetzten Hilfsmittel für die Entwicklung und Konstruktion. Eine adäquate Produktgliederung ist in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung. Grundsätzliche Lösungsansätze für die Produktgliederung werden in Teil 4 vorgestellt. Die dort behandelten Produktformen wie Baukästen, Module, Plattformen usw. gestatten es, die einmal entwickelten Produktkomponenten in verschiedenen Produktausprägungen zu nutzen. In Abschn. 7.2 schließlich finden sich grundsätzliche Hinweise zum Einsatz rechnerunterstützter Hilfsmittel. Die in den genannten Abschnitten dargestellten, z. T. seit längerem bekannten Ansätze sind zwischenzeitlich im Rahmen des PLM-Gedankens konsequent weiterentwickelt und integriert worden.

### 6.1.3 Unternehmensziele und ihre Auswirkungen

Das Hauptziel jedes Wirtschaftsunternehmens ist die Erzeugung von Gewinn. Dieses Hauptziel muss auf konkrete Einzelziele und Maßnahmen zum Erreichen dieser Ziele heruntergebrochen werden. Um eine dauerhafte Marktpräsenz zu sichern, gibt es zwei unterschiedliche generische Strategien. Die erste besteht in der Erlangung der Kostenführerschaft. Die resultierenden Unternehmensziele bzw. Umsetzungsstrategien sind ein Vertrieb in die Breite, eine Fertigung mit großer Stückzahl und eine konsequente Produkt-

standardisierung. Die zweite Strategie ist die der Leistungsdifferenzierung. Die Ziele, bzw. Maßnahmen zur Umsetzung bestehen in einem Vertrieb in speziellen Fachgebieten, einer leistungsfähigen, flexiblen Fertigung und einer Fachspezialisierung der Entwicklung und Konstruktion. Beide strategischen Ansätze haben naturgemäß auch eine zeitliche Komponente. Dies äußert sich in dem Unternehmensziel, schneller mit einem neuen Produkt am Markt zu sein als der Wettbewerber.

Eine extreme Strategie verbindet die beiden o. g. Sie gewinnt im Rahmen des zunehmenden Wettbewerbs immer mehr an Bedeutung. Sowohl das Ziel der Kostenführerschaft als auch das der Leistungsdifferenzierung haben Auswirkungen auf den Entwicklungs- und Konstruktionsbereich.

In der nächst tiefer liegenden Zielebene werden neben vielen weiteren Zielen solche zum

- Produkt: u. a. seine Funktionalität und Eigenschaften betreffend und
- Markt: u. a. Time to Market, also implizit die Zeit, die für die Entwicklung und Konstruktion des Produkts zur Verfügung steht, sowie die einzuhaltenden Kosten, Target Costing (Ehrlenspiel et al. 1998),

festgelegt.

Für die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung eines Unternehmens ist es also sehr wichtig, die Unternehmensziele, ihre Beziehungen untereinander und ihre Gewichtung genau zu kennen. Eine wichtige Aufgabe der Leitung des Bereichs Technik besteht in der richtigen Vermittlung der für die Technik relevanten Unternehmensziele an jeden Mitarbeiter.

#### 6.1.4 Durchführung der Produktplanung

Insbesondere bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) ist eine Produktplanung als institutionalisierte Arbeitsphase oft nicht erkennbar; Entwicklungsaufgaben basieren auf Produktideen, die oft scheinbar zufällig aufgrund des „richtigen Riechers“ des Unternehmens bzw. einzelner verantwortlicher Personen entstehen, ohne dass ein systematisches Vorgehen zugrunde liegt. Diese Vorgehensweise kann zu erfolgreichen Produkten führen, solange das Unternehmen über Mitarbeiter mit dem entsprechenden „Talent“ verfügt (Kramer und Kramer 1997).

Viele Unternehmen versuchen jedoch zur nachhaltigen Sicherung des Unternehmenserfolges, neben der Produktentwicklung und Konstruktion, auch die Produktplanung mit methodischen Ansätzen durchzuführen, um Ideen zu neuen Produkten zu generieren. Die verfolgte Zielsetzung ist dabei eine Steigerung sowohl der Effizienz als auch der Effektivität der Produktplanung: Einerseits werden Dauer und Kosten des Prozesses transparenter (Planung und Controlling), andererseits soll im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertbarkeit die Qualität der Produktideen gesteigert, also das Risiko eines Flops minimiert werden.

Die Produktplanung ist für den *Innovationsgrad* neuer Produkte von zentraler Bedeutung (vgl. Abschn. 6.1.1); vereinzelt wird diese Phase des Produktentstehungsprozesses auch als *Innovationsplanung* bezeichnet (Eversheim 2003). Sie steht im unmittelbaren Zusammenhang zu den Unternehmenszielen und Unternehmensstrategien (vgl. Abschn. 6.1.3) und ist daher „Chefsache“ (Hauschildt 2004). Neben der Unternehmensleitung können je nach Ausrichtung des Unternehmens Mitarbeiter aus verschiedenen Abteilungen, wie Marketing, Forschung und Entwicklung, Vertrieb, Konstruktion, Fertigung usw., aber auch unternehmensexterne Schlüsselkunden und Dienstleister eingebunden sein. Erfolgt eine Produktplanung innerhalb bestehender Produktlinien mit überwiegender Weiterentwicklung oder systematischer Variantenbildung (Baureihen und Baukästen), so dominiert die zuständige Entwicklungsabteilung oder es wird aus dem Produktbereich eine spezielle Planungsgruppe gebildet, die auch das neue Produkt weiter betreut. Erfolgt eine Produktplanung außerhalb bestehender Produktlinien zum Zwecke gänzlich neuer Produkte oder zur Diversifikation des Produktprogramms, wird besser eine neue, unvorbelastete Planungsgruppe eingesetzt, die dann entweder als längere Stabsabteilung oder als befristete Arbeitsgruppe tätig sein kann.

Die Unternehmensgröße bestimmt die Möglichkeiten zur Bildung interdisziplinärer Projektgruppen oder Stabsabteilungen. Bei kleineren Unternehmen müssen ggf. externe Fachberater hinzugezogen werden, um notfalls fehlendes eigenes Know-how auszugleichen. Eigenes Know-how zu verwerten ist dagegen oft risikoärmer und bildet beim Kunden ein tieferes Vertrauen.

Oft wird dem Bereich der Produktplanung organisatorisch noch die Produktverfolgung (Weiterbeobachtung und Bewertung bei der Produktrealisierung) und die Produktüberwachung (Erfassung des Kosten- und Erfolgsverhaltens auf dem Markt sowie Einleitung von geeigneten Steuerungsmaßnahmen) übertragen. Im Rahmen dieses Buches soll die Produktplanung im engeren Sinne, d. h. nur als Vorlauf zur Produktentwicklung, betrachtet werden.

Für den Erfolg eines Produkts ist es von zentraler Bedeutung, dass dieses den Wünschen und Bedürfnissen des Kunden entspricht. Als Folge dieser Erkenntnis hat sich die Kundenorientierung zunehmend zu einer Integration der Kundensicht bis hin zu seiner direkten Integration in alle Phasen der Produktentstehung entwickelt (Beitz 1996; Kleinaltenkamp et al. 1996). Die QFD-Methode (Quality Function Deployment), die auf dem Leitgedanken des Kundenwunsches als zentraler Aspekt des Innovationsprozesses aufbaut, wurde entsprechend als unterstützendes Werkzeug zur Überführung von Kundenwünschen in Produktmerkmale in der Produktplanung eingeführt (Eder 1995; Kleinaltenkamp et al. 1996). Es gibt zudem Vorschläge zur Gestaltung des Produktplanungsprozesses, die die QFD als integralen Bestandteil nutzen (Hoffmann 1997; Lesmeister 2001; Mai 1998). Prinzipbedingt weisen diese Ansätze jedoch Schwächen in Bezug auf die Planung hoch-innovativer Produkte auf: Einerseits sind gerade bisher unbekannte Kundenwünsche ein wesentlicher Ansatz für Neuprodukte. Andererseits behindert die frühzeitige Festlegung auf Produktmerkmale die Definition von Produktvorschlägen mit neuartigen Eigenschaften.

QFD-basierte Ansätze zur Produktplanung eignen sich daher besonders zur Überarbeitung bestehender Produkte (Seidel 2005).

Neben diesen Ansätzen gibt es zahlreiche Vorschläge für eine systematische Produktplanung (Brankamp 1974; Eversheim 2003; Gausemeier et al. 2001; Geyer 1972; Kramer 1986; Spath et al. 2001; VDI 2220 1980), die im Wesentlichen das gleiche Vorgehen beschreiben, s. Abb. 6.6. Der zentrale Arbeitsschritt ist das Finden von Produktideen als Ergebnis einer mehr oder weniger strukturierten Suche. Nach einem Auswahlschritt schließt sich die Ausarbeitung bzw. Konkretisierung zu Produktvorschlägen an, was im Wesentlichen dem methodischen Konzipieren auf einer weniger verbindlichen Ebene entspricht. Wann diese zur Marktreife weiterentwickelt werden, wird in der Umsetzungsplanung festgelegt bzw. es erfolgt ein Entwicklungsauftrag und der Produktvorschlag wird, um eine Anforderungsliste erweitert, der Entwicklung und Konstruktion übergeben.

Der dargestellte Vorgehensplan ist nicht als starre Abfolge deutlich trennbarer Arbeitsschritte zu verstehen; er ist kein „Geradeausweg“ mit sequenzieller Abfolge, sondern nur Leitfaden für ein grundsätzlich zweckmäßiges Handeln. Je nach Unternehmen können die einzelnen Tätigkeiten im Unternehmen institutionalisiert und regelmäßig erfolgen oder die Produktplanung wird zu bestimmten Zeitpunkten als Projekt im Sinne einer Vorentwicklung durchgeführt. Entsprechend vielfältig sind auch die anwendbaren Hilfsmittel.

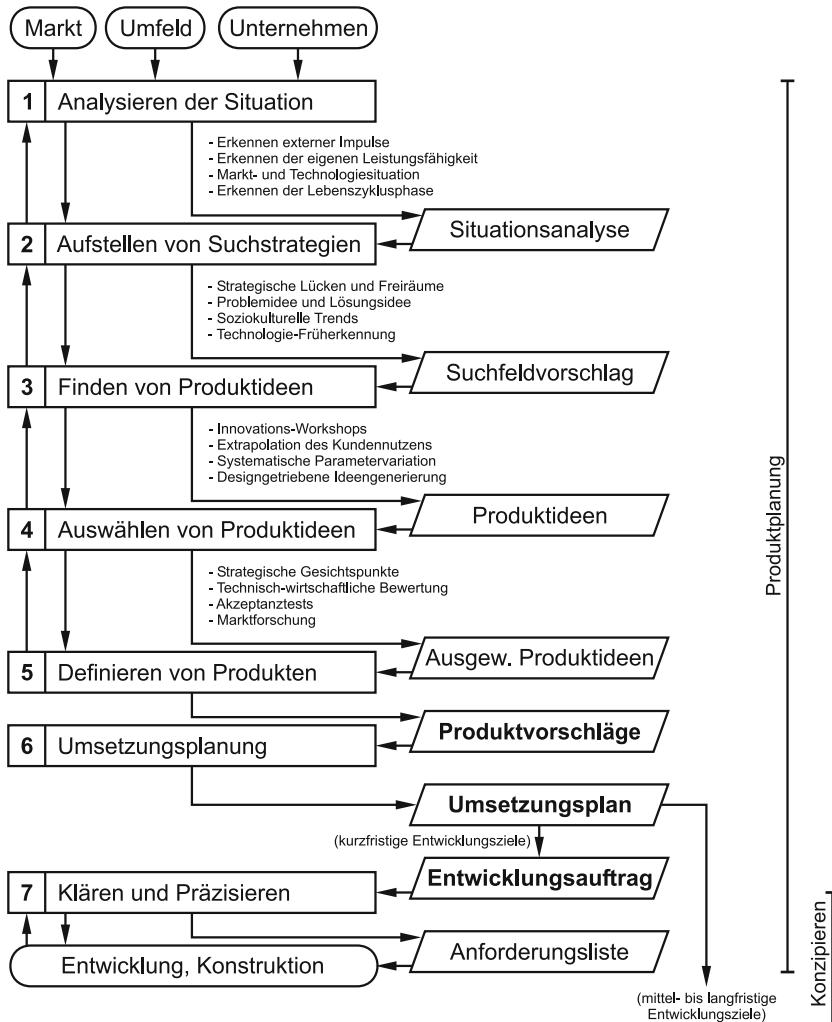
Die im Folgenden dargestellten Techniken und Methoden haben daher beispielhaften Charakter. In der praktischen Handhabung wird ein iteratives Vorgehen mit Vor- und Rücksprüngen oder Wiederholungen auf höherer Informationsstufe notwendig sein und ist auch im Sinne einer erfolgreichen Produktfindung keineswegs falsch.

## 1. Analysieren der Situation

*Erkennen externer Impulse* Das Erfassen und Sammeln von Daten bzw. Impulsen von außen, also aus dem Markt und dem sonstigen Umfeld, als auch aus dem Unternehmen selbst, ist die wesentliche Voraussetzung für eine zielgerichtete Produktplanung. Die Daten und Impulse können sowohl der Auslöser für eine Produktplanung sein als auch Ansätze zur Suche nach Produktideen liefern. Beispiele für diese Impulse sind:

aus dem Markt:

- Technische und wirtschaftliche Stellung des eigenen Produkts am Markt, insbesondere erkennbare Veränderungen (Umsatzrückgang, Entwicklung des Marktanteils),
- Änderung der Marktwünsche und Bedürfnisse, z. B. nach neuen Funktionen oder neuer Formgebung,
- Anregungen und Kritik der Kunden und
- technische und wirtschaftliche Vorteile der Produkte von Wettbewerbern;



**Abb. 6.6** Vorgehen bei der Produktplanung (in Anlehnung an Kramer 1986; VDI 2220 1980)

vom Umfeld:

- Eintreten wirtschaftspolitischer Ereignisse, z. B. Erdölverteuerung, Ressourcenverknappung, Transporteinschränkungen,
- Substitutionen durch neue Technologien und Forschungsergebnisse, z. B. mikroelektronische Lösungen für bisher mechanische Lösungen, biometrische Nutzererkennung statt Passwortschutz, Laserschneiden statt Brennschneiden usw. und
- neue Umweltauflagen und Recycling bei bestehenden Produkten und Verfahren;

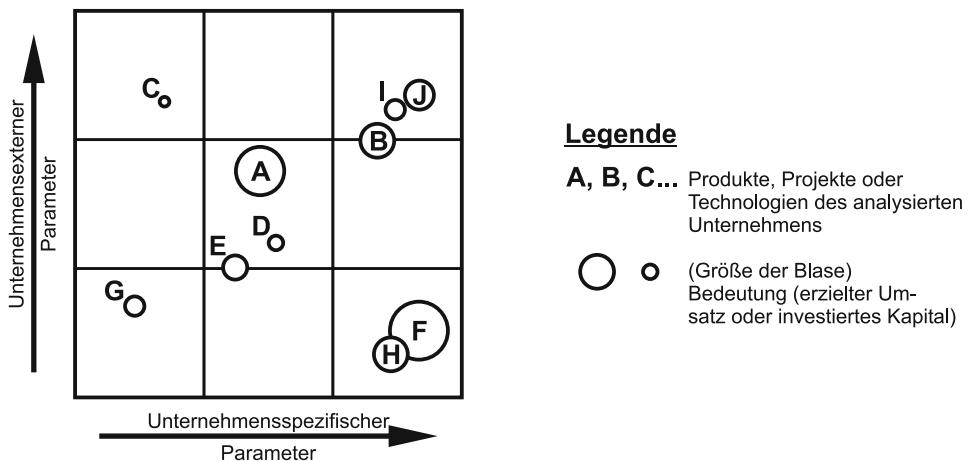
aus dem eigenen Unternehmen:

- Nutzung von Ideen und Eigenforschungsergebnissen in Entwicklung und Fertigung,
- neue Funktionen zur Erweiterung oder Befriedigung des Absatzgebietes,
- Einführung neuer Fertigungsverfahren,
- Rationalisierungsmaßnahmen in der Produktpalette und der Fertigungsstruktur,
- Nutzung von Beteiligungsmöglichkeiten und
- höherer Diversifikationsgrad, d. h. genügend breite Abstützung auf mehrere Produkte, die sich im Lebenszyklus sinnvoll überlappen.

Angesichts stetig kürzer werdender betriebswirtschaftlicher Lebenszyklen ist eine Produktplanung als Reaktion auf das Bekanntwerden solcher Impulse heute oft zu spät. Ein Umsatzzrückgang bildet zunehmend den einzigen Anlass für eine Produktplanung, ohne dass sonstige Impulse inhaltliche Ansätze liefern könnten. Aus diesem Grund müssen entsprechende Fakten zur Gewinnung eines zeitlichen Vorteils prognostiziert werden, wozu bestehende Trends herangezogen werden können. Das Erkennen von Trends sowie die Anwendung solcher Erkenntnisse sind jedoch derart aufwändig bzw. komplex, dass dies nur selektiv im Hinblick auf die strategische Ausrichtung des Unternehmens geschehen kann. Diese Festlegung erfolgt im Rahmen des Aufstellens von Suchstrategien (s. u.).

*Erkennen der eigenen Leistungsfähigkeit: Portfoliotechnik* Die Darstellung der aktuellen Situation des Unternehmens erleichtert das Erkennen von Handlungsoptionen. Dazu werden unternehmensspezifische Daten gesammelt, ggf. aufbereitet und in einer überschaubaren Form unternehmensexternen Daten gegenübergestellt. Die entsprechende grafische Darstellung dieser beiden Dimensionen als *Portfolio-Matrix* (kurz: Portfolio) ist als wesentliches Werkzeug seit den 1970er Jahren in verschiedenen Managementmethoden etabliert. Vor allem im Hinblick auf die Darstellung der Technologiesituation und der Marktsituation eines Unternehmens existieren zahlreiche Modifikationen der *Portfoliotechnik*, über die beispielsweise (Eversheim 2003) einen Überblick gibt.

Bei der Erstellung einer Portfolio-Matrix wird die Position von Objekten des Unternehmens, (z. B. Produkte, Projekte oder Technologien) in einer Tafel eingetragen, wobei die x-Koordinate üblicherweise einen unternehmensspezifischen Parameter darstellt und die y-Achse einen unternehmensexternen Parameter, s. Abb. 6.7. Die Position des Objekts auf der Tafel, die in 4 oder 9 Felder unterteilt sein kann, erlaubt seine Klassifizierung; die Verteilung erlaubt eine Aussage über den Zustand des Unternehmens. Vereinzelt werden den Feldern *Normstrategien* zugewiesen, also Anweisungen, wie mit den jeweiligen Objekten zu verfahren ist, um den Unternehmenserfolg zu gewährleisten (Pfeiffer et al. 1991). Grundsätzlich kann ein Portfolio nicht nur – wie es im Folgenden betrachtet werden soll – zur Darstellung des gegenwärtigen Zustands („Ist-Portfolio“) sondern auch eines erwarteten zukünftigen oder angestrebten Zustands („Soll-Portfolio“) verwendet werden (vgl. Eversheim 2003; Pfeiffer et al. 1991; Specht et al. 2002).



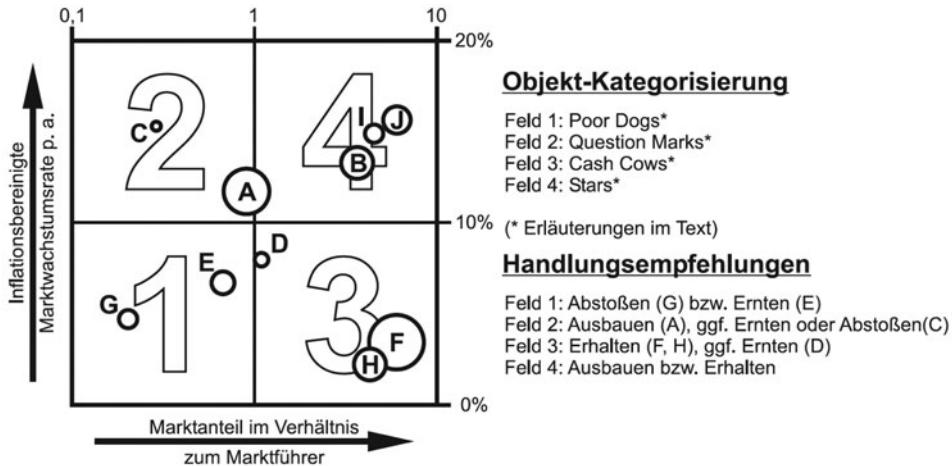
**Abb. 6.7** Portfolio-Matrix, allgemeiner Aufbau

Die Aussagekraft von Portfolios muss kritisch betrachtet werden, da ein Portfolio mit nur einem Parameterpaar immer nur Teilespekte eines Objekts darstellt. Insbesondere die Verfolgung von Normstrategien ist stets zu hinterfragen, da zwischen den dargestellten Objekten Wechselwirkungen bestehen können. Insgesamt ist das Portfolio jedoch ein nützliches Instrument der Situationsanalyse. Im Folgenden werden zu einzelnen Analysebereichen beispielhaft Portfolios anderer Urheber vorgestellt (vgl. auch Abschn. 6.1.1).

**Marktsituation** Das Erkennen und Klären der Stellung der derzeitigen Eigenprodukte auf den derzeitigen Märkten hinsichtlich Umsatz, Gewinn und Marktanteil lässt Stärken und Schwächen der einzelnen Produkte erkennen. Besonders interessant ist der direkte Vergleich mit dem jeweiligen Marktführer. Diese Aspekte werden besonders anschaulich durch das *Marktportfolio* der Boston Consulting Group dargestellt, s. Abb. 6.8.

Die unternehmensspezifische Kennzahl ist hier der eigene Marktanteil im Verhältnis zu dem des Marktführers, wobei die entsprechende Achse im dargestellten Beispiel logarithmisch geteilt ist. Mit einer Teilung in 4 Felder ergibt sich somit die Kategorisierung „hoher“ bzw. „niedriger Marktanteil“, je nachdem, ob das eigene Unternehmen den größten Marktanteil aufweist oder nicht. Als unternehmensexterne Kennzahl wird die Marktwachstumsrate verwendet, die im unteren Bereich anders als im dargestellten Beispiel auch negative Werte („gesättigter Markt“) annehmen kann. Diese Kennzahl stellt nicht die Umsatzentwicklung des eigenen Produkts (ein Indikator der betriebswirtschaftlichen Lebenszyklusphase, vgl. Abschn. 6.1.2), sondern die Entwicklung des insgesamt im entsprechenden Marktsegment erzielten Umsatzes dar.

Mit diesem Portfolio werden die Produkte des Unternehmens grob in 4 Gruppen eingeteilt, die hier als „Poor Dogs“, „Question Marks“, „Cash Cows“ und „Stars“ bezeichnet

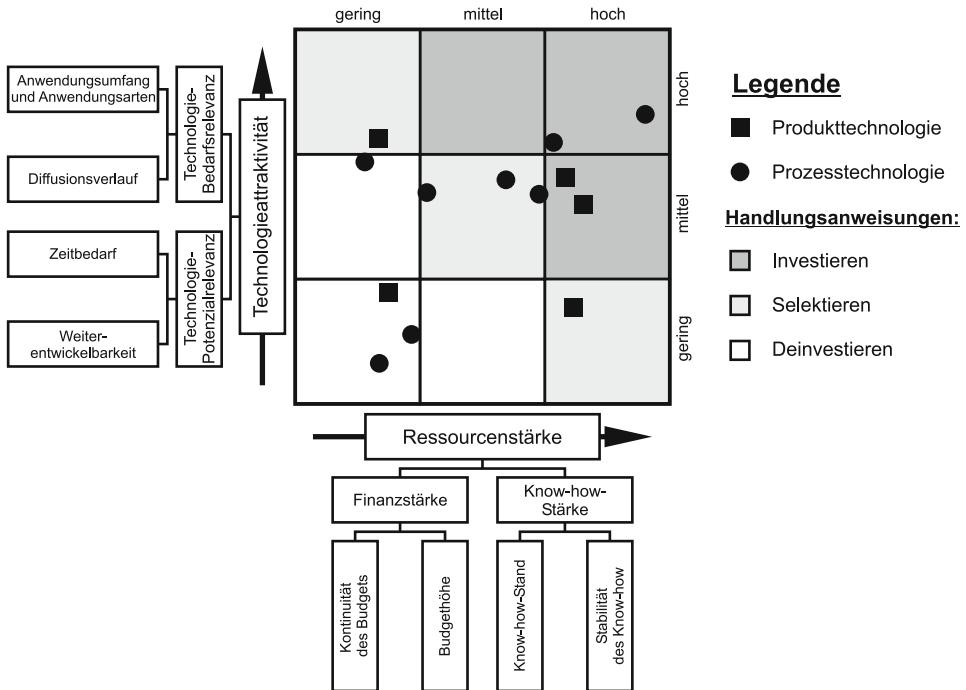


**Abb. 6.8** Marktporfolio der Boston Consulting Group (in Anlehnung an Eversheim 2003; Kotler und Bliemel 1999)

werden. Die Stars weisen nicht nur einen hohen Umsatz aufgrund des hohen Marktanteils auf, sondern zudem eine günstige Perspektive aufgrund des wachsenden Marktes. Hier sind oft Investitionen nötig, um die wachsende Nachfrage bedienen zu können, die den Gewinn reduzieren. Anders bei den Cash Cows: Da die benötigten Kapazitäten bestehen, kommt die aus hohen Stückzahlen resultierende günstige Kostenstruktur (skalenbedingte Kostenvorteile) voll zur Geltung, wodurch diese Produkte hohe Gewinnspannen erwirtschaften. Die Poor Dogs weisen weder eine günstige Kostenstruktur noch eine Perspektive auf eine attraktivere Absatzsituation auf, während die Situation für die Question Marks komplexer ist. Hier muss geklärt werden, ob eine Steigerung des Marktanteils in Verbindung mit einer Kostensenkung aufgrund von Lerneffekten auf dem ansonsten attraktiven Markt möglich ist. Die für die entsprechenden Kategorien vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen (Kotler und Bliemel 1999) sollen hier nicht näher diskutiert werden.

*Technologiesituation* Während mit dem Marktporfolio die Leistungsfähigkeit des Unternehmens bzw. seiner Produkte hauptsächlich aus absatzwirtschaftlicher Sicht (Specht et al. 2002) beurteilt wird, existieren auch Ansätze, nach denen die Portfoliotechnik genutzt wird, um eine technologiebezogene Sichtweise darzustellen. Stellvertretend für verschiedene Technologie-Portfolioansätze soll hier das *Technologieportfolio* von Pfeiffer et al. 1991 vorgestellt werden. Außerdem existieren Mischformen, also integrierte Markt-Technologie-Portfolios (Eversheim 2003; Specht et al. 2002; Wolfrum 1994).

Beim Technologieportfolio von Pfeiffer werden Technologien anhand der Parameter „Ressourcenstärke“ (unternehmensspezifischer Parameter) und „Technologieattraktivität“ (unternehmensexterner Parameter) in das Portfolio eingetragen, s. Abb. 6.9. Bei den Technologien werden Produkttechnologien und Prozesstechnologien unterschieden, die



**Abb. 6.9** Technologieportfolio (nach Pfeiffer et al. 1991)

zunächst durch eine gedankliche Zerlegung der Produkte des Unternehmens in Subsysteme, Baugruppen usw. identifiziert, geordnet und zusammengefasst („geclustert“) und in getrennten Listen aufgeführt werden. Unter einer Produkttechnologie wird dabei eine Technologie verstanden, die unmittelbar im Produkt umgesetzt ist (also z. B. dessen Wirkungsweise bestimmt), während Prozesstechnologien im weiteren Sinne zu dessen Produktion angewendet werden. Zwischen den einzelnen Objekten im Portfolio und den Produkten des Unternehmens besteht also in der Regel keine eindeutige Zuordnung.

Die Parameterwerte werden durch Bewertung der in Abb. 6.9 dargestellten Einzelfaktoren und der gewichteten Zusammenfassung der erzielten Punktzahlen ermittelt. Bei der Berechnung der Ressourcenstärke geht neben der Finanzstärke die Know-how-Stärke als Hauptfaktor ein, für die neben dem Know-how-Stand (Fähigkeiten und Wissen der Mitarbeiter bzw. des Unternehmens) auch die Stabilität des Know-hows relevant ist. Letztere ist beispielsweise als schlecht zu bewerten, wenn eine hohe Fluktuation bei den Mitarbeitern vorliegt. In die Technologieattraktivität gehen mit der Technologie-Bedarfsrelevanz auch absatzwirtschaftliche Faktoren ein. Die Technologie-Potenzialrelevanz hingegen beschreibt mit der Weiterentwickelbarkeit und dem Zeitbedarf für die nächste Entwicklungsstufe ausschließlich die technischen Erfolgsaussichten einer Technologie.

Das Technologieportfolio dient der Ressourcenallokation bzw. der Investitionsplanung in der Technologieentwicklung. Entsprechend werden den verschiedenen Bereichen des Portfolios die Handlungsanweisungen Investieren, Selektieren und Deinvestieren zugewiesen.

*Erkennen der Lebenszyklusphase* Der betriebswirtschaftliche Lebenszyklus eines Produkts (vgl. Abschn. 6.1.2) wird sowohl von der Marktsituation als auch der Technologiesituation beeinflusst und muss daher stets im Zusammenhang mit diesen beiden Komplexen betrachtet werden. Besonders im Hinblick auf Art und Umfang der Produktinnovation und die zeitliche Umsetzungsplanung ist ein Erkennen der aktuellen Lebenszyklusphase wichtig. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, bestehende Produkte lediglich geringfügig zu aktualisieren, um auf einem wachsenden Markt ein reifes Produkt zu stabilisieren. Im Hinblick auf eine ausgeglichene Gesamt-Umsatzentwicklung werden einander überdeckende betriebswirtschaftliche Lebenszyklen angestrebt.

Auch ein Erkennen der technologischen Produktlebenszyklusphase ist von wesentlicher Bedeutung. So gilt es zu entscheiden, ob weitere Investitionen zur Leistungssteigerung einer etablierten Technologie Erfolg versprechend sind, die Technologie also noch Entwicklungspotenzial aufweist, oder eine Substitution dieser Technologie notwendig wird.

## 2. Aufstellen von Suchstrategien

*Strategische Lücken und Freiräume* Aus der Situationsanalyse resultieren möglicherweise unmittelbar erkennbare Lücken in Bezug auf attraktive Märkte oder Technologien, nach denen gesucht werden kann oder muss. Die Anfertigung von transformierten Technologie-Portfolios kann hier hilfreich sein. Oft ist das Unternehmen jedoch hinsichtlich der strategischen Ausrichtung in Bezug auf die Frage, ob neue Märkte erschlossen werden oder neues Technologie-Know-how aufgebaut werden soll, festgelegt. Neue Märkte erfordern aufwändige Analysen und Vorüberlegungen als eingefahrene Vertriebswege und bekannte Kundenkreise.

Für die Bestimmung von Suchfeldern für Produktideen ist somit die Ausrichtung des Unternehmens zu beachten. Zunächst soll geklärt werden, was unter einer Produktidee zu verstehen ist.

*Problemidee und Lösungsidee* Geht man in Übereinstimmung mit den hier vertretenen Ansätzen zur Produktentwicklung davon aus, dass ein technisches Produkt ein Problem des Nutzers löst (*Was tut es?*), indem es einen Zweck erfüllt, und dies aufgrund der gewählten technischen Lösung für das technische Problem geschieht (*Wie tut es das?*), so ergeben sich zwei grundlegende Ansätze, aus denen sich Produktideen ergeben:

- eine neue Lösung für ein bekanntes Problem: *Lösungsidee* und
- ein neues Problem für eine bekannte Lösung: *Problemidee* (bei Eversheim 2003 auch Produktidee 1. Ordnung genannt)

Die Fokussierung auf neue, zu lösende Probleme oder neue Anforderungen wird dabei auch als *Demand-Pull*, der Versuch neue Technologien zu etablieren auch als *Technology-Push* bezeichnet. Je nach Ausrichtung des Unternehmens wird sich die strategische Suche auf einen der beiden Ansätze konzentrieren, wenn auch in der Praxis erfolgreiche Produktinnovationen oft eine Kombination aus Push und Pull darstellen (Hauschildt 2004).

Da Produktentwicklungen einen großen Zeitraum benötigen, müssen Faktoren wie entstehende Probleme, neue Anforderungen und Bedürfnisse, aber auch zur Verfügung stehende Technologien prognostiziert werden, wenn gegenüber der Konkurrenz ein zeitlicher Vorsprung bei der Markteinführung erzielt werden soll. In diesem Zusammenhang ist der Umgang mit soziokulturellen Trends und der Technologie-Früherkennung notwendig.

*Soziokulturelle Trends* Unter einem *Trend* kann grundsätzlich jede statistisch erfassbare Tendenz verstanden werden, im Bereich der Produktplanung bezieht sich der Begriff jedoch überwiegend auf den soziokulturellen Kontext. Zur Identifikation und Beschreibung von Trends beschäftigt sich die *Trendforschung* mit dem Wandel der Gesellschaft in Bezug auf soziodemografische Merkmale und Wertvorstellungen. Trends sind verhältnismäßig langfristige Entwicklungen von konsumrelevanten Phänomenen, die im Gegensatz zu Moden branchenübergreifend sind und durch die Reaktion von Konsumentengruppen auf ihre Lebensumstände und deren Wandel entstehen.

Für KMU in technischen Branchen sind soziokulturelle Trends oft schwer zu handhaben, weil im Marketing nicht die Kenntnisse vorliegen, mit den überwiegend vorliegenden „weichen“ Faktoren umzugehen. Es gilt zu klären, ob ein Trend „evident“ ist, d. h. vorliegende Daten tatsächlich eine strategisch relevante Veränderung ankündigen, und ob ein erkannter Trend einen „Impact“ aufweist, das Unternehmen also tatsächlich betroffen ist (vgl. Gausemeier et al. 2001). Schließlich gilt es, die Erkenntnisse über einen Trend auf das Produkt anzuwenden, also Problemideen abzuleiten. Hierzu können spezialisierte, in der Regel branchenübergreifend arbeitende Dienstleister, sog. Trendbüros, beauftragt werden. Ein oft praktikablerer Weg für KMU ist jedoch die Einbeziehung von Schlüsselkunden bzw. Lead-Usern in die Produktplanung (Geschka 1991). Diese fungieren in der Konsumentengruppe als „Trendsetter“ oder „Innovatoren“, sind also früh in der Lage, zukünftige Anforderungen zu formulieren, die sich dann beispielsweise in Workshops unmittelbar in Produktideen umsetzen lassen (vgl. Lubkowitz 1997).

*Technologie-Früherkennung* Entscheidungen zum Einstieg in neue Technologien müssen aufgrund der langen Vorlaufzeiten in der Regel dann fallen, wenn die betrachtete Technologie noch sehr jung ist, also nur wenige Informationen als Entscheidungsgrundlage vorliegen. Den resultierenden Unsicherheiten ist mit einem systematischen Vorgehen zu begegnen. Es gilt aus der Menge aller Technologien nach der Festlegung eines Suchraums, die als möglicherweise relevant erkannten Technologien mit geeigneten Hilfsmitteln, wie z. B. der Portfolioanalyse, zu untersuchen (vgl. Specht et al. 2002).

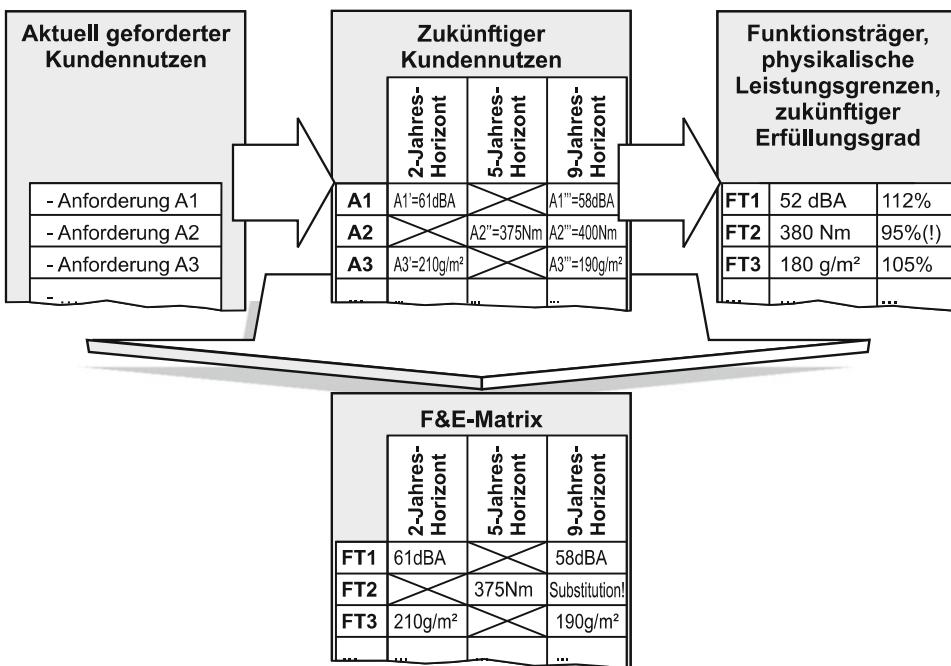
Wie auch bei soziokulturellen Trends besteht bei der technologischen Früherkennung die wesentliche Problematik im Erkennen und Interpretieren „schwacher Signale“. Hier werden die beiden Teilbereiche der strategischen Exploration (ungerichtet) und strategischen Überwachung (gerichtet) unterschieden (Seidel 2005) (vgl. „Scanning/Monitoring“ bei Gausemeier et al. 2001). Specht teilt die in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Früherkennung in indikator-, modell-, analyse-, informationsquellen- und netzwerkorientierte Ansätze ein und gibt für das Vorgehen der Technologiefrüherkennung die Arbeitsschritte Signalexploration, Signaldiagnose und Prognose von Ereignisauswirkungen an (Specht et al. 2002). Hier findet sich auch ein Überblick zu qualitativen und quantitativen Prognosetechniken, von denen beispielsweise die Delphi-Methode (vgl. Abschn. 6.3.3) und die Szenario-Technik (vgl. Abschn. 6.2.3.2) auch in anderen Phasen der Produktentstehung Anwendung finden können.

### 3. Finden von Produktideen

Es gibt keine Methode, deren Anwendung das Hervorbringen von erfolgreichen Produktideen garantiert; die aufgeführten Ansätze können diesen Arbeitsschritt jedoch unterstützen.

*Innovations-Workshops* Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Ideengenerierung können Ideenfindungs-Workshops sein, bei denen neben Mitarbeitern verschiedener Abteilungen wichtige Kunden und Zulieferer beteiligt sein können. Diese werden unter Berücksichtigung der zuvor definierten Suchfelder unter Zuhilfenahme intuitiver Methoden, wie dem Brainstorming (vgl. Abschn. 6.3.3) sowie Kreativitätstechniken, aber auch diskursiver Methoden, wie Ordnungsschemata und dem morphologischen Kasten, durchgeführt. Wichtig sind hierbei die Abgrenzung vom Tagesgeschäft zur Schaffung kreativer Freiräume und die Dokumentation aller Ideen. Eine Bewertung und Auswahl soll erst im folgenden Arbeitsschritt erfolgen. Für intuitiv gewonnene Produktideen müssen Situationsanalysen und eine Verträglichkeitsprüfung mit den Suchstrategien nachgeholt werden.

*Extrapolation des Kundennutzens* Sind konkrete neue Anforderungen nicht bekannt, ist ein Ansatz zu neuen Problem- und damit Produktideen die Extrapolation des aktuellen Kundennutzens eines konkreten Produkts in die Zukunft. Ausgehend von bekannt gewordenen Trends oder von offensichtlichen Optimierungsrichtungen (z. B. geringerer Kraftstoffverbrauch) werden die aktuellen Leistungsspezifikationen entsprechend geändert – möglichst als quantitative Aussage (z. B. Reduzierung um 15 % in 5 Jahren) – als zukünftige Anforderungen formuliert. Diese neuen Forderungen (es handelt sich also prinzipiell um einen Pull-Ansatz zur Produktinnovation) werden den Funktionsträgern, also Baugruppen oder Bauteilen, zugeordnet. Anschließend wird das Potenzial der einzelnen Funktionsträger hinsichtlich des Grades der Erfüllung der zukünftigen Kundennutzenforderungen abgeschätzt (vgl. technologischer Produktlebenszyklus, Abschn. 6.1.2), s. Abb. 6.10. Aus diesen Betrachtungen ergibt sich somit der Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Neu-



**Abb. 6.10** Aus dem Kundennutzen abgeleitete Produktziele (A = Anforderung, FT = Funktionsträger)

bzw. Weiterentwicklung von Bauteilen und Baugruppen bzw. – im Fall einer notwendigen Technologie-Substitution – der Bedarf nach Grundlagenforschung. Gemäß dieser Herangehensweise lässt sich aus einer Gewichtung der Forderungen des Kundennutzens eine Priorisierung der Entwicklungsaufgaben ableiten.

Prinzipiell lassen sich durch diese Vorgehensweise nur quantitativ neue Anforderungen ableiten. Es wird vorgeschlagen, diese Technik zum Erkennen qualitativ neuer Anforderungen beispielsweise um die Szenario-Technik als weiteres Hilfsmittel zu erweitern, die sich auch für langfristige Zukunftsprognosen eignet (vgl. Gausemeier 1995; Gausemeier et al. 1995). Aufgrund des hohen Aufwands für die Szenario-Vorbereitung, die Szenariofeld-Analyse, die Szenario-Prognostik und die Szenario-Bildung lohnt sie nur für unternehmenserhaltende, wichtige Geschäftsfelder.

*Systematische Parametervariation* Ein systematischer Ansatz zur Generierung von Produktideen ohne vorliegende Anstöße von außen ist das erneute gedankliche Durchlaufen des Produktenstehungsprozesses eines bestimmten Produkts im Sinne der Konstruktionsmethodik, wobei alle produktdarstellenden Modelle und Werte systematisch variiert werden (vgl. Koller 1998a). So können möglicherweise innovative Produkte gebildet werden durch Variation von

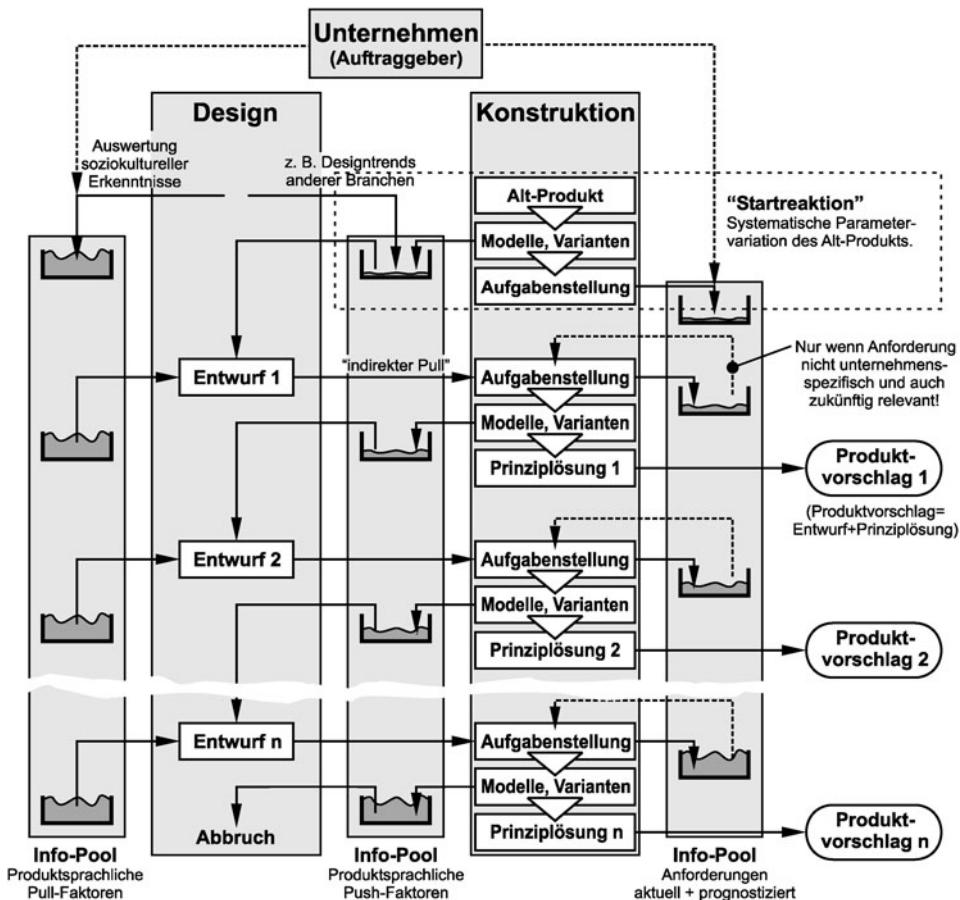
- Zweckbeschreibungen (in der Regel lösungsneutral!),
- Funktionen oder Funktionsstrukturen,
- Effekten oder Effektstrukturen,
- Effektträgern,
- Gestaltparametern oder Gestaltstrukturen,
- usw.

Diese Herangehensweise entspricht prinzipiell dem Push-Ansatz, da nicht der Kundenwunsch der Ausgangspunkt ist, sondern der andere Lösungsansatz.

*Designgetriebene Ideengenerierung durch Dienstleister* Im Zuge der zunehmenden Auslagerung von Prozessen der Produktentstehung aus den Unternehmen gewinnt auch die Einbeziehung von Dienstleistern in die Produktplanung an Bedeutung (Glauner und Korte 2003). Hier werden zunehmend Industrie-Designer hinzugezogen, was damit begründet wird, dass das Design in der Lage ist, „weiche“ soziokulturelle Faktoren, die für Techniker schwer handhabbar sind, unmittelbar in Entwürfe umzusetzen (Brezing 2005). Diese beinhalten außer einer „ästhetischen Produktidee“ technische Aspekte, wie den Funktionsumfang, die Wahl von Werkstoffen, Baustrukturen usw., und liefern somit auch technische Innovationsimpulse.

Ein wesentlicher Vorteil der Einbeziehung von Designbüros für die Produktinnovation ist, dass diese branchenübergreifend arbeiten und somit, neben Kenntnissen über Trends, Wissen über neue Entwicklungen, insbesondere Werkstoffe und Fertigungsverfahren, aus anderen Branchen einbringen können. Zudem agiert das Design als „Anwalt des Nutzers“ (Heufler 1987); es kann aufgrund einer anderen Sichtweise des technischen Produkts bestehende und künftige Anforderungen formulieren, die sonst möglicherweise mit einer stark technik- oder unternehmensspezifischen Sicht unerkannt geblieben wären.

Aus der Zusammenarbeit von Dienstleistern des Industrie-Designs und der Konstruktion resultiert ein Prozess zur Generierung von Produktideen bzw. Produktvorschlägen, s. Abb. 6.11. Die theoretische Grundlage dieses Prozesses ist die Anerkennung eines Zweckbegriffs, der über den rein praktischen Zwecks eines Produkts hinausgeht. Demnach weist – analog zur Kaufentscheidung eines Kunden, die zu einem Teil rational und objektiv nachvollziehbar ist, zu einem anderen Anteil jedoch emotional und individuell – ein technisches Produkt zwei Funktionskomplexe auf: die technisch/praktische Funktion und die sog. *produktsprachliche Funktion*. Während der erste Komplex die Kompetenz des Ingenieurs in Entwicklung und Konstruktion ist, betrifft der zweite – die Domäne des Designs – in erster Linie soziokulturelle Aspekte, die sich der Kompetenz und den Methoden des Ingenieurs entziehen. Da beide Komplexe jedoch für den Erfolg eines Produkts (wenn auch – je nach Produktart – in verschiedenen Abstufungen) relevant sind, müssen sie schon während der Produktplanung stets im Zusammenhang beurteilt werden. Unter der produktsprachlichen Funktion mit den Teilbereichen der *ästhetischen Funktion*, der *Symbolfunktion* und der *Anzeichenfunktion* werden die Merkmale eines Produkts zusammengefasst, die mit dem Nutzer „kommunizieren“ und die vom Nutzer genutzt werden,



**Abb. 6.11** Designgetriebene Ideengenerierung zwischen Design- und Ingenieurdiensleistern (nach Brezing 2005)

um mit seiner Umwelt zu kommunizieren. Diese Merkmale enthalten also abhängig vom Kontext, in dem das Produkt betrachtet wird, denotative und konnotative Bedeutungen (vgl. Bürdek 2005; Steffen 2000).

Daraus folgt, dass der gesamte Nutzen, den ein Produkt aufweist, aus der Summe der technisch/praktischen und den produktsprachlichen Nutzen resultiert; ein technisch überlegenes Produkt kann gegenüber einem, das zusätzlich ein gutes Design aufweist (in der komplexen produktsprachlichen Bedeutung, die vom einfachen *Styling* abgrenzen ist) insgesamt minderwertig sein. Außerdem folgt, dass nicht nur der Bereich der rationalen Funktionen und Anforderungen bzw. deren Erfüllung (also Technologie) der Ursprung von Innovationen sein kann, sondern auch das Design. Auch Produkte, die bekannte Funktionen mit etablierten Technologien erfüllen, können vom Kunden als innovativ wahrgenommen werden.

Die produktsprachliche Wirkung eines Designentwurfs lässt sich nicht additiv durch die Kombination von Teilwirkungen erzielen, wie es in der Konstruktionsmethodik für die technische Funktion vorausgesetzt wird (vgl. z. B. die Kombination von physikalischen Effekten zu einer Prinziplösung). Zudem lässt sich ein Designentwurf nicht abstrahieren. Folglich muss ein Produktvorschlag zur Beurteilung bereits einen Designentwurf des gesamten Objekts enthalten, wobei der Grad der Detaillierung u. U. sehr gering sein kann, um seine gewünschte Wirkung zu veranschaulichen.

Im Rahmen der designgetriebenen unternehmensexternen Produktplanung werden unter bewusster Vernachlässigung unternehmensspezifischer Randbedingungen Produktvorschläge (hier: validiertes technisches Konzept mit Designentwurf) ausgearbeitet und dann vorgestellt, wobei Vertreter des beauftragenden Unternehmens bei der Präsentation wie ein potenzieller Kunde mit den Produktvorschlägen konfrontiert werden. Ein derart „objektivierter“ Blickwinkel soll die Entscheidungsfindung der Unternehmensleitung unterstützen, ohne dass sich diese mit abstrakten und wenig konkreten Daten wie Markt- oder Technologiepotenzialanalysen auseinandersetzen muss.

Der bei Brezing 2005 vorgeschlagene Prozess zur Generierung von Produktideen bzw. Produktvorschlägen beruht auf den unterschiedlichen Kompetenzen der beiden Domänen, genauer, der Fähigkeit, unterschiedliche Daten von außen aufgrund unterschiedlicher Arbeitsweisen in produktdarstellende Modelle unterschiedlichen Abstraktionsgrades umzusetzen, s. Abb. 6.11. Durch die Zusammenarbeit erhalten beide Disziplinen neue Impulse, die sonst nicht zugänglich oder verarbeitbar wären. So setzt das Design soziokulturelle Faktoren wie Trends (hier „produktsprachliche Pull-Faktoren“ genannt) in Entwürfe um, die die Konstruktion – als neue Aufgabenstellung aufgefasst („indirekter Pull“) – mit den in diesem Buch behandelten Mitteln des methodischen Konzipierens verarbeiten kann. Stellt sich der Designentwurf als technisch umsetzbar heraus, resultiert ein Produktvorschlag. In jedem Fall werden jedoch bei der Bearbeitung der Konstruktionsaufgabe neue Erkenntnisse gewonnen (Funktionsstrukturen, anwendbare Lösungsprinzipien, Werkstoffe usw.), die wiederum dem Design als Input für neue Designentwürfe dienen („produktsprachliche Push-Faktoren“). Die strukturierte Speicherung und Bereitstellung sämtlicher Daten in sog. „Info-Pools“ ist Teil des methodischen Vorgehens. Als „Startreaktion“ des Prozesses kann eine systematische Parametervariation auf Grundlage eines existierenden Produkts durchgeführt werden.

#### 4. Auswählen von Produktideen

Um den Aufwand der Produktplanung auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen, muss die Menge der Produktideen durch einen Auswahlschritt reduziert werden. Ein solcher Auswahlprozess kann auch später mit den ausgearbeiteten Produktvorschlägen erfolgen. Die hier angesprochenen Ansätze gelten in beiden Fällen.

Für eine erfolgreiche Produktplanung und -entwicklung ist es unerlässlich, dass beide Bereiche aufeinander abgestimmt nach gleichen Methoden und korrespondierenden Bewertungs- und Entscheidungskriterien arbeiten. Mindestens in den letzten Phasen der

**Tab. 6.1** Entscheidungskriterien für die Produktplanung

Kriterien	Gewichtung (%)
<i>Unternehmensziele:</i>	$\geq 50$
Ausreichender Deckungsbeitrag	
Hoher Umsatz	
Hohe Marktzusatzrate	
Hoher Marktanteil (Marktführer)	
Kurzfristige Marktchance	
Große Funktionsvorteile für Anwender und ausgezeichnete Qualität	
Differenzierung zum Wettbewerb	
<i>Unternehmensstärken:</i>	$\geq 30$
Hohes Know-how	
Gute Sortimentsergänzung und/oder Programmerweiterung (Diversifikation)	
Starke Marketingposition	
Geringer Investitionsbedarf	
Geringe Beschaffungsprobleme	
Günstige Rationalisierungsmöglichkeiten	
<i>Umfeld:</i>	$\geq 20$
Geringe Substitutionsgefahr	
Schwacher Wettbewerb	
Günstiger Patentstatus	
Geringe allgemeine Restriktionen	

Produktideenauswahl und Produktdefinition sollte der Produktentwicklungsbereich aktiv beteiligt werden, und die zum Produktvorschlag zugehörige Anforderungsliste ist in der für die Produktentwicklung geeigneten Form (vgl. Abschn. 6.2.3) gemeinsam zu erstellen.

*Strategische Gesichtspunkte* Für eine Bewertung hinsichtlich unternehmensstrategischer Aspekte können die Entscheidungskriterien nach Tab. 6.1 herangezogen werden, soweit entsprechende Daten schon erfassbar sind. Die dort angegebene Gewichtung bringt zum Ausdruck, dass die Unternehmensziele Vorrang vor anderen Kriterien haben sollten. Oft lassen sich aber z. B. der Investitionsbedarf oder die Beschaffungsprobleme noch nicht beurteilen, sie bleiben dann zunächst noch unberücksichtigt. Ergänzend können auch hier die erarbeiteten Portfolios Anwendung finden; durch Eintragen der Produktideen in die bereits erarbeiteten Ist- oder Soll-Portfolios kann eine Aussage über die wichtigsten Größen der Markt- und Technologieattraktivität getroffen und überprüft werden, ob Produktideen oder -vorschläge eine sinnvolle Sortimentserweiterung darstellen.

*Technisch-wirtschaftliche Bewertung* Soweit genügend auswertbare Daten vorliegen, können die Produktideen bzw. Produktvorschläge technisch-wirtschaftlichen Bewertungs- und

Auswahlverfahren unterworfen werden, vgl. Abschn. 6.4. Es genügt im Sinne der rationellen Anwendung von Auswahlverfahren oft, mit nur binären Wertungen (ja/nein) zu arbeiten, um aussichtsreiche Produktideen von anderen zu trennen.

**Akzeptanztests** Je nach Ausarbeitungsgrad kann es zur Abschätzung der Marktaufzeptanz sinnvoll sein, die Produktideen bzw. -vorschläge (reale oder virtuelle Mockups, Renderings, Produktbeschreibungen usw.) bei Workshops ausgewählten Kunden vorzustellen, etwa als Teil eines Innovationsworkshops oder einer Produktklinik, (vgl. Specht et al. 2002). Zur Vorbereitung einer weiteren Ausarbeitung sind jetzt auch Einzelmethoden wie das QFD (Eder 1995; Kleinaltenkamp und Plinke 2000) oder die Conjoint-Analyse (Eversheim 2003; Specht et al. 2002) anwendbar.

**Marktforschung** Zur genaueren Untersuchung des Marktpotenzials und zur Vorbereitung einer verbindlichen Anforderungsliste können entsprechend aufbereitete und präsentierbare Produktideen oder -vorschläge dem Marketing für Marktforschungsaktivitäten übergeben werden.

## 5. Definieren von Produkten

In dem Auswahlverfahren günstig erscheinende Produktideen werden nun konkreter beschrieben und präzisiert. Dazu werden im Wesentlichen die Verfahren des methodischen Konzipierens angewendet. Hierbei ist es sehr nützlich, bereits die Merkmale von Anforderungslisten, wie sie bei der Produktentwicklung herangezogen werden, zu beachten. Verkauf, Marketing, Entwicklungslabors und Konstruktion sollten spätestens jetzt bei der Konkretisierung von Produktideen aktiv mitwirken. Das lässt sich erzwingen, wenn diese Bereiche zum Auswählen von Produktideen und Bewerten von definierten Produkten herangezogen werden.

Die sich ergebenden Produktvorschläge werden dann nach einem weiteren Bewertungs- und Auswahlschritt an die Umsetzungsplanung weitergegeben.

Ein Produktvorschlag soll

- eine Beschreibung der beabsichtigten Funktionen voranstellen, eine vorläufige Anforderungsliste enthalten, die so weit wie möglich nach den gleichen Merkmalen erarbeitet worden ist, wie sie später von der Produktentwicklung beim Klären der Aufgabe und Aufstellen der endgültigen Anforderungsliste benutzt werden,
- alle Anforderungen an das neue Produkt lösungsneutral formulieren. Das Wirkprinzip sollte nur so weit festgelegt, dann aber begründet werden, wie dies aus übergeordneter Sicht zwingend notwendig erscheint, z. B. als Sortimentsergänzung zu einem bestehenden Produkt, oder weil das Wirkprinzip im Sinn einer Push-Innovation als Produkteigenschaft wesentlich ist. Anregungen oder Vorschläge zum Wirkprinzip sollen dagegen immer mitgeteilt werden, insbesondere dann, wenn bei der Produktideenfindung bereits geeignet erscheinende Lösungsprinzipien sichtbar geworden sind.

Sie dürfen die Produktentwicklung aber nicht vorfixieren (vgl. auch lösungsneutrale Formulierung der Anforderungen Abschn. 6.3) und

- ein Kostenziel oder einen Kostenrahmen im Zusammenhang mit den Unternehmenszielen angeben, wobei die zukünftigen Absichten, z. B. hinsichtlich Stückzahlen, Sortimentsergänzung, neuem Abnehmerzweig usw., deutlich werden sollen.

## 6. Umsetzungsplanung und Entwicklungsauftrag

Die Umsetzung sämtlicher als verfolgungswürdig erkannter Produktvorschläge wird schließlich in einem übergreifenden Plan von der Unternehmensleitung festgelegt. Ein solcher Plan, auch als Innovation-Roadmap bezeichnet (Eversheim 2003), ist dabei als dynamisches Planungswerkzeug zu verstehen, das vor allem im Rahmen einer institutionalisierten und kontinuierlichen Produktplanung einer ständigen Überarbeitung unterliegt. Der wesentliche Aspekt eines solchen Plans ist sein Planungshorizont; neben einer kurzfristigen Planung unmittelbar umzusetzender Produktvorschläge enthält dieser auch langfristige Entwicklungsziele und Maßnahmen, die nur mittelbar der Markteinführung geplanter Produkte dienen, wie Patentanalysen, Technologiemonitoring, Entwicklungskooperationen, Grundlagenforschung usw. Der Umsetzungsplan ist auch die Grundlage für ein Innovations-Controlling, das sich nicht nur auf den technischen Bereich (Forschung, Entwicklung und Konstruktion) sondern auch auf das Marketing und seine Maßnahmen (Durchführen von Marktstudien, Entwickeln von Markteinführungsstrategien usw.) bezieht.

Die Planung selbst erfolgt in der Regel rückwärts von angesetzten Markteintrittsterminen aus, die möglicherweise auf der Grundlage von erkannten „Markteintrittsfenstern“ festgelegt werden, also Zeiträumen, in denen auf einem Markt eine passende Bedarfssituation vorliegt (Abell 1978). Da technische Mängel und Schwachstellen bei der Einführung neuer Produkte oft eine verheerende Wirkung für den Ruf solcher Produkte haben, gehören Zeit zur Erprobung und das Einkalkulieren einer Risikobegegnung mit zu einer sorgfältigen Umsetzungsplanung. Überschreitungen von angekündigten Markteinführungsterminen sind ebenso imageschädlich, weil sie technische Schwierigkeiten signalisieren.

Bei der Planung und Einführung neuer Produkte auch zum Zweck der Diversifikation ist ein Machtpromotor, z. B. ein Mitglied der Geschäftsleitung, hilfreich, der sich mit einem einzelnen Produktvorschlag identifiziert, um Desinteresse und konventionelle Widerstände ggf. besser zu überwinden (Geschka 1991).

Für die kurzfristigen Entwicklungsziele des Umsetzungsplans wird ein Entwicklungsauftrag erteilt, der hervorhebt, dass die Produktentwicklung und Konstruktion sowie die Produktplanung trotz teilweise identischer Methoden und Hilfsmittel zwei getrennte Vorgänge sind, die sich in zwei Punkten deutlich unterscheiden:

- Verbindlichkeit: Im Unterschied zur Entwicklung und Konstruktion ist bei der Planung das Arbeitsergebnis weder definiert noch ist abgesichert, dass überhaupt eines hervorgebracht wird,

- Aufwand: Mit dem technischen Entwurf und der Ausarbeitung sind die zeit- und kostenintensivsten Arbeitsschritte der Produktentwicklung in der Produktplanung nicht enthalten.

---

## 6.2 Methodisches Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung (Arun Nagarajah)

### 6.2.1 Einleitung

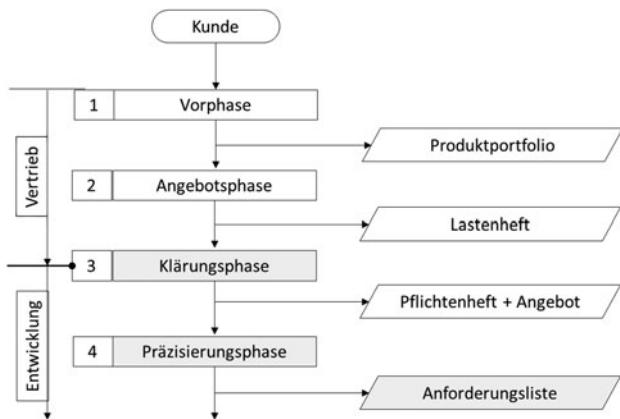
Der Produktentwicklungsprozess wird mit einer Aufgabenstellung angestoßen. Somit besteht der erste Schritt im Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Die Aufgabenstellung wird im Allgemeinen von der Produktplanung (als Entwicklungsauftrag) oder vom Vertrieb (als konkrete Bestellung) an die Entwicklung herangetragen. Ob die Aufgabenstellung von der Produktplanung oder vom Vertrieb kommt, hängt davon ab, ob es sich um einen anonymen Kundenkreis (Produktplanung) oder um einen spezifischen Kunden (Vertrieb) handelt. Im Weiteren wird die Vorgehensweise zur Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung für den spezifischen Kunden näher erläutert.

In Abb. 6.12 sind vier Phasen dargestellt, die zu Beginn der Produktentstehung im Allgemeinen für einen spezifischen Kunden durchlaufen werden. In der Vorphase nimmt entweder der Kunde den Kontakt zum Unternehmen auf oder der Vertrieb spricht einen Kunden konkret an. In beiden Fällen wird das Produktpotfolio des Unternehmens dem Kunden vorgestellt. Falls das bestehende Produktpotfolio das Interesse des Kunden weckt, finden in der Angebotsphase Gespräche zwischen ihm und dem Vertrieb statt, um Inhalt und Umfang des anstehenden Auftrags zu klären. Die schriftliche Anfrage vom Kunden, in dem die Anforderungen des Kunden dokumentiert sind, wird als Lastenheft bezeichnet. In den meisten Fällen können durch die bestehenden Produkte nicht alle Anforderungen des Kunden realisiert werden und bedürfen kundenspezifischer Anpassungen. Die geforderten Anpassungen können zur Entwicklung neuer Produktkomponenten führen.

Sobald ein Lastenheft bzw. eine konkrete schriftliche Anfrage des Kunden vorliegt, wird die Entwicklungsabteilung in die Klärungsphase eingebunden. In dieser Phase wird nicht nur geprüft, inwieweit die gewünschten Änderungen technisch realisiert werden, sondern auch ob diese auch für das Unternehmen gewinnbringend umgesetzt werden können. Der entwickelte Produktvorschlag wird mit dem Kunden besprochen. Das Ergebnis der Klärungsphase ist das Pflichtenheft, welches den vom Unternehmen erarbeiteten Realisierungsvorschlag und damit die Beschreibung der Umsetzung des vom Kunden vorgegebenen Lastenheftes beinhaltet. Aufbauend auf dem Pflichtenheft wird der Vertrag geschlossen.

Nach dem Vertragsabschluss erhält die Entwicklungsabteilung den Auftrag zum Entwickeln des Produkts. Die Aufgabenstellung in Form des Auftrages enthält neben dem Pflichtenheft meistens noch Aussagen zu einzuhaltenden Terminen und Kosten. Die Entwicklungsabteilung steht nun vor der Aufgabe, die für das zu entwickelnde Produkt maßgeblichen lösungs- und gestaltbeeinflussenden Produktanforderungen zu erkennen,

**Abb. 6.12** Phasen bis zur Erstellung der Anforderungsliste

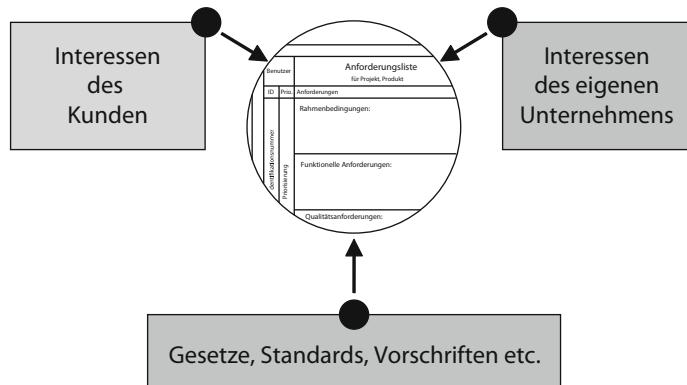


nach Möglichkeit mit quantitativen Angaben zu formulieren und zu dokumentieren. Das Ergebnis dieser Präzisierungsphase ist die Anforderungsliste. Sie ist die Zusammenstellung sämtlicher Anforderungen an das Produkt. Somit beinhaltet sie nicht nur die Anforderungen, welche die Interessen des Kunden berücksichtigen (Lastenheft), sondern auch solche, die insbesondere die Interessen des Unternehmens wahren (Pflichtenheft). Zudem müssen die im Allgemeinen sehr umfangreichen Marktrahmen, wie z. B. Gesetze, Standards oder Vorschriften, ebenfalls berücksichtigt werden. Hierdurch steht die Anforderungsliste in dem in Abb. 6.13 dargestellten Spannungsfeld.

In diesem Kapitel werden Vorgehensweisen und Methoden vorgestellt, die den Entwickler sowohl bei der Klärungs- als auch bei der Präzisierungsphase zielführend unterstützen. In der Klärungsphase werden die wesentlichen Kundenanforderungen identifiziert und überprüft, inwieweit sie technisch umgesetzt werden können. Aus dieser Überprüfung heraus muss die Entscheidung getroffen werden, welches Angebot dem Kunden unterbreitet werden kann. Der Entwickler steht vor dem Problem, diese wichtige Entscheidung in einer kurzen Zeit treffen zu müssen. Für das Lösen dieses Problems sollen dem Entwickler Methoden an die Hand gegeben werden.

Der Aufwand zur Erstellung einer guten Anforderungsliste ist mit dem Aufwand in der Konzept- oder Gestaltungsphase vergleichbar und wegen der weittragenden Folgen für das Produkt nicht zu unterschätzen (Roth 2000). In der Praxis wird aber die Bedeutung der Anforderungsliste oft unterschätzt (Schroda 2000). Die Folge ist, dass die Anforderungen nicht über den Detaillierungsgrad eines Pflichtenhefts hinausgehen, der für die Produktentwicklung nicht ausreichend ist. Die hierdurch resultierenden Mängel werden erst in späteren Produktlebensphasen entdeckt, wodurch die Kosten zu ihrer Beseitigung umso höher sind, je später diese im Verlauf des Produktlebenszyklus entdeckt werden (Ehrlenspiel 1995).

Die Frage nach der Vollständigkeit der Anforderungsliste kann nur unbefriedigend beantwortet werden. Auf der einen Seite führen fehlende Anforderungen zu Problemen in den weiteren Entwicklungsphasen, aber auf der anderen Seite ist es nicht möglich, alle



**Abb. 6.13** Spannungsfeld der Anforderungsliste

Anforderungen zu Beginn einer Entwicklung zu bestimmen. Deshalb muss es das Ziel sein, zu Beginn der Produktentwicklung mindestens die Anforderungen zu ermitteln, wodurch die Produktmängel signifikant reduziert werden. Dieses Ziel wird mithilfe der in diesem Kapitel vorgestellten Methoden erreicht.

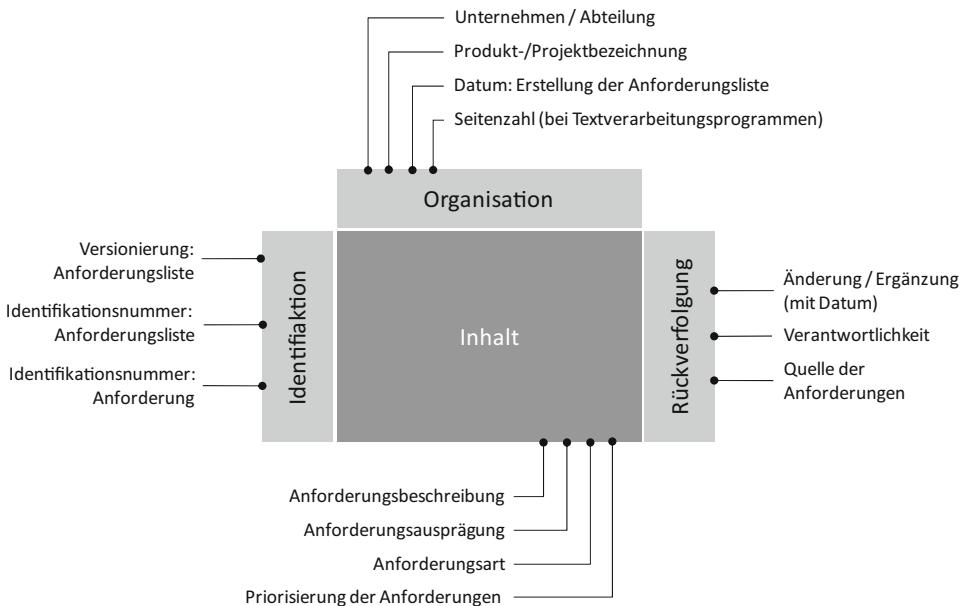
Die Anforderungsliste dokumentiert zu Beginn der Entwicklung die Anforderungen, mit der eine Produktentwicklung begonnen werden kann. Die Anforderungen sind sehr dynamisch. So führen neue Erkenntnisse während der Entwicklungsphase zwangsläufig zu Ergänzungen bzw. Änderungen der Anforderungen und damit zur Änderung der Anforderungsliste. Deshalb muss sie über die Produktentwicklung sorgfältig gepflegt werden. Durch eine gründliche Dokumentation werden zudem die beteiligten Partner zu einer klaren Stellungnahme gezwungen, wenn sie mit den in der Anforderungsliste dokumentierten Sachverhalten nicht einverstanden sind.

## 6.2.2 Aufbau und Erstellung der Anforderungsliste

Die Anforderungsliste wird in der Praxis sowohl durch Textverarbeitungsprogramme, wie z. B. Microsoft Word, oder durch spezielle Softwareprogramme, wie z. B. IBM Rational DOORS, erstellt und verwaltet. Unabhängig von dem verwendeten Programm müssen bestimmte Punkte beim Aufbau der Anforderungsliste berücksichtigt werden (s. Abb. 6.14). Diese werden im Folgenden näher erläutert.

### 6.2.2.1 Aufbau

Jede Anforderungsliste besteht aus den folgenden vier Kernbereichen:



**Abb. 6.14** Aufbau einer Anforderungsliste

**Organisation** Im Bereich Organisation werden die Informationen, wie z. B. die zuständige Abteilung, Erstellungsdatum usw. dokumentiert (s. Abb. 6.14). Bei der Erstellung der Anforderungsliste mit Textverarbeitungsprogrammen werden diese Angaben auf dem Kopfbereich der Liste platziert. Zudem werden hierbei auch die Seitenzahlen erfasst.

**Identifikation** Die Informationen im Bereich der Identifikation sind für eine durchgängige Verwaltung sowohl der Anforderungsliste als auch der Anforderungen erforderlich (s. Abb. 6.14). Ohne eine Identifikationsnummer und eine Versionierungsnummer ist eine sinnvolle elektronische Datenverwaltung nicht möglich.

**Inhalt** Im Bereich Inhalt werden die Anforderungen an das Produkt schriftlich dokumentiert (s. Abb. 6.14). Der Begriff der Anforderungen wird zum Teil sehr unterschiedlich definiert (Nagarajah 2011). Im Folgenden soll die Definition nach Kickermann (1995) verwendet werden. Kickermann versteht unter einer Anforderung *eine Vorgabe, deren Erfüllung den zielgerichteten Verlauf des jeweiligen Konstruktionsprozesses steuert und/oder Eigenschaften des betreffenden Produktes bestimmt* (Kickermann 1995).

Die Anforderungen müssen verständlich und eindeutig beschrieben werden, um spätere Fehlinterpretationen zu vermeiden (Methode zur Anforderungsbeschreibung, vgl. Abschn. 6.2.3.5). An der Produktentwicklung sind viele verschiedene Stakeholder beteiligt, die unterschiedliche Anforderungen an das Produkt stellen. Als Stakeholder werden Personengruppen, wie z. B. Kunde, Gesetzgeber oder Servicemitarbeiter, bezeichnet, die

Anforderungen an das Produkt stellen. Die von den Stakeholdern an das Produkt gestellten Anforderungen werden nach POHL 2008 in die folgenden drei Grundkategorien unterteilt:

- Rahmenbedingungen,
- Funktionalanforderungen und
- Qualitätsanforderungen.

Die Rahmenbedingungen stellen die allgemeinen Restriktionen bei der Produktentwicklung dar, die in der Regel nicht verändert werden können (unternehmensextern) bzw. nicht verändert werden sollen (unternehmensintern). Unternehmensexterne Rahmenbedingungen sind z. B. Umweltgesetze und unternehmensinterne Rahmenbedingungen sind Anforderungen z. B. über unternehmensspezifische Produktions- oder Logistiksysteme. Die Rahmenbedingungen definieren den Raum, in dem das neue Produkt entwickelt werden muss. Da diese Anforderungen in der Regel für die Entwicklung des gesamten Produktpportfolios eines Unternehmens gelten, sollten diese derart dokumentiert und verwaltet werden, dass ein schneller Zugriff auf sie ermöglicht wird.

Funktionalanforderungen beschreiben die Tätigkeiten, durch die der Zweck des Produkts realisiert werden soll. Diese Anforderungen sind für die Erstellung des Produktkonzepts von entscheidender Bedeutung.

Qualitätsanforderungen definieren die nicht funktionalen Eigenschaften des Produkts, wie z. B. die Zuverlässigkeit. Erst nachdem mehrere Konzepte mithilfe der Funktionsanforderungen entwickelt worden sind, ist es sinnvoll die Qualitätsanforderungen zu nutzen, um anhand dieser die entwickelten Konzepte zu bewerten.

In der Praxis besteht ein großes Konfliktpotenzial zwischen den Rahmenbedingungen und den Funktionalanforderungen des Kunden (vgl. Abschn. 6.2.3.4). So können z. B. durch Umweltgesetze Funktionen, die der Kunde in dem Produkt realisiert haben möchte, eingeschränkt werden. Diese Konflikte müssen frühzeitig erkannt und mit dem Kunden besprochen werden. Für die Klärung ist es wichtig zu wissen, welche Prioritäten die untereinander im Konflikt stehenden Anforderungen im Hinblick auf das zu entwickelnde Produkt haben. Deshalb wird die Priorität einer Anforderung ebenfalls in der Anforderungsliste dokumentiert (Methoden zur Priorisierung der Anforderungen: Abschn. 6.2.3.3). Eine Priorisierung setzt voraus, dass die Ausprägung einer Anforderung bekannt ist. Die Ausprägungen der Anforderungen werden durch Quantitäts- und Qualitätswerte beschrieben:

- Quantitätswert: alle Angaben über Anzahl, Stückzahl, Losgröße und Menge, oft auch pro Zeiteinheit wie Leistung, Durchsatz, Volumenstrom usw., somit alle Anforderungen, die eindeutig vom Konstrukteur ausgelegt werden können
- Qualitätswert: alle Angaben über zulässige Abweichungen und besondere Anforderungen wie tropenfest, korrosionsbeständig, Wertanmutung usw., somit alle Anforderungen, die nicht eindeutig ausgelegt werden können

Die Anforderungen sollen so weit wie möglich durch Zahlenangaben präzisiert werden, um die Forderung nach einer eindeutigen Beschreibung zu erfüllen. Falls eine Präzisierung durch Zahlenangaben nicht möglich ist, müssen verbale Aussagen möglichst eindeutig formuliert werden (vgl. Abschn. 6.2.3.5).

**Rückverfolgung** Im Bereich der Rückverfolgung werden alle Informationen erfasst, um den Lebenszyklus einer Anforderung und damit ihre Änderungen nachvollziehen zu können (s. Abb. 6.14). Hierbei ist es sinnvoll, die Anforderungsquelle, aus der die Anforderung ermittelt worden ist, mit anzugeben (vgl. Abschn. 6.2.3.1). So ist zur jeder Anforderung ein Hinweis, von wem sie genannt wurde oder wer Auskunft geben kann, sehr zweckmäßig. Es ist dann möglich, den Urheber der Anforderung und seine Beweggründe zurückzuverfolgen und sie zu klären. Dieses Vorgehen wird besonders wichtig bei der Frage, ob im Laufe einer Entwicklung eine Anforderung aufrechterhalten werden muss oder auch zur Eliminierung eines Konflikts angepasst werden darf.

Änderungen und Ergänzungen der Aufgabenstellung, wie sie sich im Laufe der Entwicklung nach besserer Kenntnis der Lösungsmöglichkeiten oder infolge zeitbedingter Verschiebung der Schwerpunkte ergeben können, müssen stets in der Anforderungsliste nachgetragen werden (s. Kap. 6.2.4.1). Sie stellt so am Anfang einer Entwicklung die vorläufig verbindliche und dann die jeweils aktuelle Aufgabenstellung dar.

### 6.2.2.2 Erstellung einer Anforderungsliste

Ein Beispiel für den formalen Aufbau von Anforderungslisten stellt Abb. 6.15 dar. Für die Lesbarkeit der Anforderungsliste kann es nützlich sein, sie nach Merkmalen einer Leitlinie (s. Abb. 6.18) zu gliedern. Das Formular für Anforderungslisten wird sinnvollerweise in einer Werksnorm festgelegt.

Federführend für die Erstellung der Anforderungsliste ist der verantwortliche Konstruktions- oder Entwicklungsleiter. Die Anforderungsliste ist allen mit der Entwicklung des neuen Produkts in Berührung stehenden Stellen (Geschäftsleitung, Verkauf, Berechnung, Versuch usw.) zur Verfügung zu stellen. Die Anforderungsliste wird nur auf Beschluss der verantwortlichen Entwicklungsleitung (Entwicklungskonferenz) geändert bzw. erweitert.

Die besondere Bedeutung einer Anforderungsliste für die gesamte Produktentwicklung erfordert eine qualitativ hochwertige Erstellung. Um ihre Qualität sicherstellen zu können, muss sie die folgenden Kriterien erfüllen:

**Lesbarkeit** Eine Anforderungsliste ist lesbar, wenn sowohl die Beschreibung der Anforderungen keine sprachlichen Defizite aufweist als auch ihre Struktur eine einfache Erfassung der Anforderungen durch den Entwickler unterstützt.

**Vollständigkeit (zu Beginn der Produktentwicklung)** Eine Anforderungsliste ist als vollständig zu betrachten, wenn alle für das Beginnen der Entwicklung notwendigen Anforderungen erfasst sind. Ob alle wichtigen Anforderungen erfasst sind, kann nicht allgemein-

Anforderungsliste für Projekt, Produkt			Ausgabe:						
Benutzer		Identifikation Klassifizierung							
ID	Prio.	Anforderungen	Blatt:	Seite:					
Eindeutige Identifikationsnummer  Priorisierung		Rahmenbedingungen:							
		Funktionalanforderungen:							
		Qualitätsanforderungen:							
			<b>Hinweis:</b> Anforderungen ggf. in Teilsysteme (Funktions- bzw. Baugruppen) oder nach Merkmalen der Leitlinie aufgliedern.						
		<table border="1"> <tr> <td>Ersetzt:</td> <td>Ausgabe vom</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				Ersetzt:	Ausgabe vom		
Ersetzt:	Ausgabe vom								

**Abb. 6.15** Formaler Aufbau einer Anforderungsliste

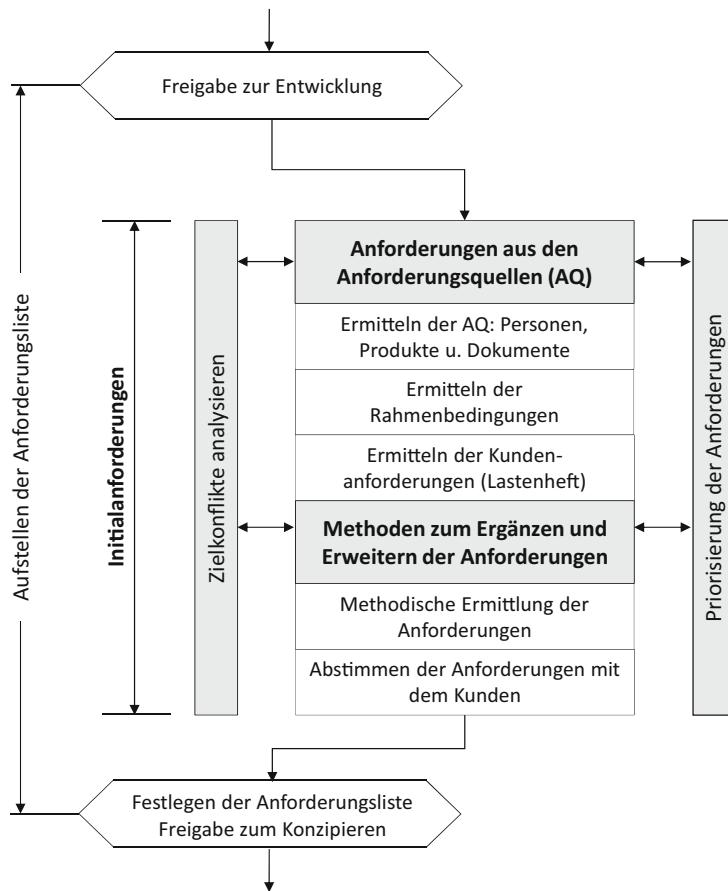
gültig festgelegt werden, sondern muss durch den Entwickler bzw. das Entwicklungsteam aufgrund der Erfahrung bestimmt werden. Für eine gründliche Anforderungsermittlung werden in Abschn. 6.2.3.2 die wichtigsten Methoden vorgestellt.

**Konsistenz** Eine Anforderungsliste ist konsistent, wenn die Anforderungen in ihr konfliktfrei dokumentiert sind (vgl. Abschn. 6.2.3.4).

**Änderungsfreundlichkeit** Eine Anforderungsliste ist änderungsfreundlich, wenn ihr Aufbau eine einfache und nachvollziehbare Änderung der Anforderungen ermöglicht.

### 6.2.3 Ermitteln der Anforderungen und Erstellen der Anforderungsliste

Die Hauptarbeitsschritte zur Erarbeitung einer Anforderungsliste sind in Abb. 6.16 dargestellt. Dabei ist ein zweistufiges Vorgehen zu erkennen. In der ersten Stufe werden die möglichen Anforderungsquellen und ihre Anforderungen ermittelt und dokumentiert. Das Augenmerk liegt vor allem auf der Identifizierung der Rahmenbedingungen, vom Kunden explizit geäußerte Anforderungen oder aus der Erfahrung des Unternehmens vorliegende Anforderungen.



**Abb. 6.16** Hauptarbeitsschritte zum Aufstellen der Anforderungsliste

In der zweiten Stufe sollen mithilfe von Methoden, wie eine z. B. Hauptmerkmalsliste, weitere Anforderungen ermittelt werden. Diese Anforderungen müssen mit den Kunden abgestimmt werden, um nicht an den Anforderungen des Kunden vorbei zu entwickeln.

Auch wenn die Anforderungsliste grundsätzlich dem Prinzip der Verbindlichkeit gehorchen muss, ist sie zu Beginn nicht vollständig und wächst mit der Produktentwicklung. Alle denkbaren Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt von Beginn an zu formulieren, ist nicht möglich. Betrachtet man den Konstruktionsprozess in seinen einzelnen Arbeitsschritten mit den jeweiligen erforderlichen Eingangsdaten und den resultierenden Ergebnissen, so wird Folgendes deutlich: Beispielsweise müssen für die Erstellung einer Lackierzeichnung eines Bauteils die einzelnen Lackschichtdicken bekannt sein. Um ein weiterzuverfolgendes Konzept aufzustellen, sind diese Daten aber nicht relevant. Die Anforderungen an den Lackaufbau können also zu einem relativ späten Zeitpunkt geklärt werden,

ohne dass die Konzeptentwicklung behindert wird. Im Gegensatz hierzu gibt es auch Anforderungen, die das Produktkonzept maßgeblich beeinflussen, wie z. B. der Bauraum. Solche konzeptbeeinflussenden Anforderungen müssen, auch wenn sie die Produktentwicklung zeitlich verzögern, identifiziert werden, da hierdurch spätere kostenintensive Iterationsschritte vermieden werden. Diese Anforderungen werden als Initialanforderungen bezeichnet. Im Weiteren wird aufgezeigt wie mithilfe entsprechender Methoden die Initialanforderungen ermittelt und weiter spezifiziert werden können. Bevor die Anforderungsliste zum Konzipieren freigegeben werden kann, müssen die Initialanforderungen ermittelt und dokumentiert worden sein. Die nachträglich zu ergänzenden Anforderungen in den weiteren Produktentstehungsphasen werden als Detailanforderungen bezeichnet.

### 6.2.3.1 Anforderungsquellen

Bei der Produktentwicklung stellen verschiedene Personen Forderungen an das zu entwickelnde Produkt. Unter Personen sollen alle Stakeholder verstanden werden, die mündlich oder schriftlich zu den Anforderungen aktiv befragt werden können. Neben Personen können auch andere Quellen zur Ermittlung von Anforderungen berücksichtigt werden. So sind die Anforderungen vom Gesetzgeber meist aus Gesetzesresten und damit aus schriftlichen Dokumenten zu entnehmen. Pohl unterteilt die Anforderungsquellen in die folgenden drei Kategorien (Pohl 2008):

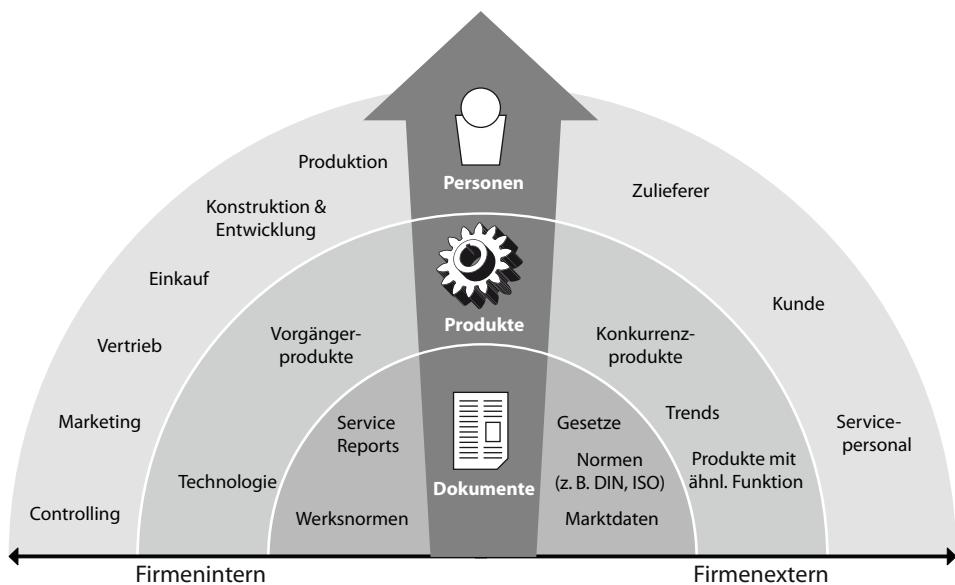
- Personen,
- Produkte und
- Dokumente.

Unter Personen werden sowohl externe, wie z. B. Nutzer oder Kunden, als auch interne, wie z. B. Monteure oder Vertriebsmitarbeiter, in Betracht gezogen.

Eine weitere Quelle für Anforderungen sind Produkte. Es werden ähnliche Produkte im Unternehmen, Konkurrenzprodukte und Produkte, die eine neu zu entwickelnde Funktionalität bereits einsetzen, betrachtet. So werden beispielsweise für die erstmalige Integration einer Kamerafunktion in einem Mobilfunktelefon bestehende Minikameras betrachtet. Durch die Analyse eines existierenden Produkts ist es für den Entwickler einfacher, mögliche Anforderungen zu ermitteln.

Die dritte Quelle für Anforderungen sind Dokumente. Diese können in allgemeingültige Dokumente, wie z. B. Gesetzesreste oder Normen, und in produktsspezifische Dokumente, wie z. B. Beschwerdereports oder Mängelberichte aus Vorgänger- oder bestehenden ähnlichen Produkten, unterschieden werden. Auch wenn die Dokumente von Stakeholdern erstellt werden, ist die Zuordnung zu den Dokumenten sinnvoll, da für die Rückverfolgbarkeit der ermittelten Anforderung der Zugriff auf das Dokument sichergestellt werden muss.

Bei der Erstellung der Anforderungsliste müssen die relevanten Anforderungsquellen aus dem Umfeld des Produkts identifiziert werden, aus der die Anforderungen für die Produktentwicklung abgeleitet werden können. Abbildung 6.17 zeigt eine Darstellung über die



**Abb. 6.17** Darstellung möglicher Anforderungsquellen

Anforderungsquellen, die bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden könnten. Es wird empfohlen, eine unternehmensspezifische Darstellung über die Anforderungsquellen zu erarbeiten und diese als Checkliste für die Ermittlung der Anforderungsquellen einer späteren Produktentwicklung zu verwenden.

Zweifelsohne ist der Kunde die wichtigste Anforderungsquelle, da er den Produkten ihre Existenzberechtigung gibt. Eine Schwierigkeit bei der Ermittlung der Kundenanforderungen ist, dass nur ein Teil der erwarteten Produkteigenschaften von ihm explizit geäußert werden. Der andere Teil wird unausgesprochen von ihm erwartet. Es handelt sich dabei um sog. implizite Anforderungen. Diese stellen im Allgemeinen das größere Problem dar, da ihre Nichterfüllung negative Auswirkungen auf die Akzeptanz des Produktes durch den Kunden haben. Für die Ermittlung dieser Anforderungen muss die Entwicklungsabteilung den Kunden und das betrachtete Marktsegment genau kennen. Dabei sind die unterschiedlichen Kundenarten zu beachten. Die Klärung und Detaillierung der Kundenanforderungen sind erheblich von der Kundenart abhängig. Es wird prinzipiell zwischen zwei Kundenarten unterschieden:

- *Anonymer Kunde:* Dabei kann es sich z. B. um den Vertrieb im eigenen Hause handeln, der einen Entwicklungsauftrag ohne Kundenauftrag stellt. Häufig ergeben sich solche Aufträge auch aus den Ergebnissen der Arbeiten eines Produktmanagements. Die Konsumgüterbranche hat typischerweise anonyme Kunden.

Bei der Produktentwicklung für den anonymen Kunden ist es sinnvoll die Anforderungen durch sog. „Lead User“ zu ermitteln. Lead User, die auch als „fortschrittlicher Kunde“ übersetzt werden können, zeichnen sich durch zwei dominierende Eigenschaften aus (Ernst 2005):

- Ein großes persönliches Interesse an dem Produkt und
- Unzufriedenheit mit dem momentanen Produktangebot

In der Produktplanung werden mehrere Lead User befragt, um Anforderungen für die neue Produktentwicklung zu ermitteln. Das Ergebnis wird als Auftrag an die Entwicklung weitergeleitet. Es ist sinnvoll, bereits zu diesem Termin die involvierten Unternehmensbereiche zu beteiligen, um entwicklungs- und konstruktionsspezifische Restriktionen mit berücksichtigen zu können.

- *Spezifischer Kunde:* Hierbei handelt es sich typischerweise um einen konkreten Kunden, der einen Entwicklungsauftrag an das Unternehmen gestellt hat. Eine typische Branche für den spezifischen Kunden ist der Anlagenbau.

Die Vorgehensweise für den spezifischen Kunden (z. B. B2B) wurde bereits ausführlich dargelegt.

Die Methoden zum Ergänzen und Erweitern der Anforderungsliste werden für die Ermittlung der Anforderungen beider Kundenarten verwendet (Abschn. 6.2.3.2).

### 6.2.3.2 Ergänzen und Überprüfen der Anforderungen

In der heutigen Zeit wird in der Regel kein Unternehmen ein Produkt entwickeln, welches vollständig losgelöst von seinem bestehenden Produktpotfolio sein wird. Hieraus kann angenommen werden, dass viele Informationen über die möglichen Anforderungsquellen in dem Unternehmen vorhanden sein werden. Diese müssen durch geeignete Methoden nach Anforderungen analysiert werden.

Die Ergänzung der Anforderungen muss gründlich durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine gründliche Anforderungsermittlung zwar höhere Entwicklungskosten verursacht, aber deutlich mehr Kosten durch die Minimierung der späteren Iterations-schritte wieder eingespart werden können. Diese möglichen Fehlkosten können nicht im Voraus beziffert und damit nur in seltenen Fällen zur Rechtfertigung der höheren Entwicklungskosten gegenüber der Geschäftsführung genutzt werden.

Es stellt sich die Frage, welche Initialanforderungen erforderlich sind, um im späteren Verlauf der Entwicklung keine grundsätzlichen und umfangreichen Änderungen vornehmen zu müssen. Damit grundsätzliche Änderungen, welche im Wesentlichen konzeptionelle Änderungen betreffen, vermieden werden, müssen folgende Größen und Eigenschaften eines Produkts vor dem Entwicklungs- und Konstruktionsbeginn bekannt sein:

Diejenigen, die

- das *Konzept* wesentlich bestimmen, z. B. die geforderte Leistung, die erforderlichen Energiearten, die zugrunde gelegten physikalischen Effekte, Einflüsse aus oder auf die Umgebung usw.,

- die *Produktgliederung*, also die Aufteilung des Produkts in Baugruppen und Bauteile im Wesentlichen bestimmen,
- die *Hauptgestalt* des Produkts bestimmen, z. B. erfordert der gegebene Einbauort einer Anlage ein bestimmtes Verhältnis von Höhe zu Breite (Bauraum).

Bevor die Anforderungen, die mit diesen Punkten assoziiert werden, nicht ermittelt worden sind, sollte mit der Produktentwicklung nicht begonnen werden. Für die Minimierung der nachträglichen Änderungen in der Produktentwicklung ist es notwendig, die wichtigen Initialanforderungen zu ermitteln und in die Anforderungsliste zu übernehmen. Die in der Praxis bewährten Methoden zum Ergänzen und Erweitern der Anforderungen sind

- das Arbeiten nach einer Leitlinie mit einer Hauptmerkmalliste,
- die Szenariotechnik,
- das perspektivenbasierte Lesen,
- die Detaillierungsmethode und
- die Prototypenbeobachtung.

**Das Arbeiten nach einer Leitlinie mit einer Hauptmerkmalliste** Beim Arbeiten nach der Leitlinie mit der Hauptmerkmalliste werden ausgehend von konkreten Punkten der vorliegenden Aufgabe durch Assoziationen weitere Erkenntnisse zu den betreffenden Punkten hervorgerufen, die dann zu relevanten Anforderungen führen (s. Abb. 6.18). Die Hauptmerkmale in der Liste sind den Bereichen Konzept, Produktlebenszyklus und Organisation zugeordnet. Die Bereiche sollen dem Anwender eine Orientierung für die Abarbeitung der Liste geben. Auch wenn Wechselbeziehungen zwischen den Hauptmerkmalen aus den Bereichen Konzept und Produktlebenszyklus existieren (Abmaße des Produkts beeinflussen auch die Transportmöglichkeiten), hat es sich als sinnvoll erwiesen, sich zuerst intensiver mit dem Konzeptbereich zu beschäftigen. Die Anforderungen aus dem Produktlebenszyklusbereich legen die Restriktionen fest (Gerechtheiten), unter denen das Produkt entwickelt werden muss, und beeinflussen maßgeblich die Gestaltung des Produktes. Der Bereich Organisation beinhaltet Aspekte, die für eine reibungslose Durchführung des Entwicklungsprojekts erforderlich sind.

**Die Szenariotechnik** Bei der Szenariotechnik wird das gesamte Produktleben von der Entstehung bis zur Entsorgung mit allen Lebensphasen durchdacht. Dabei werden in den Szenarien die Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und der Umgebung und damit auch dem Anwender zu jeder Lebensphase systematisch erfasst. Für die Erstellung und Präzisierung der ersten Szenarien können neben den Informationen, wie z. B. Lastenheft bzw. Kundenanforderungen, Richtlinien und Expertenwissen, auch folgende Fragen für jede Lebensphase des Produkts gestellt werden:

<b>Konzept</b>		<b>Produktlebensphasen</b>		
<b>Stoff</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ein- und Ausgangsprodukte:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• chemische Eigenschaften</li> <li>• physikalische Eigenschaften</li> </ul> </li> <li>- Hilfsstoffe</li> <li>- vorgeschriebene Werkstoffe (Nahrungsmittelegesetz u. ä.)</li> <li>- Materialfluss und -transport</li> </ul>	<b>Elektrik / Eletronik</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nennspannung</li> <li>- Nennströme</li> <li>- Netzschwankungen</li> <li>- Sicherung</li> <li>- Schirmung</li> <li>- Filterung</li> <li>- EMV</li> <li>- Anschluss</li> <li>- Verdrahtung</li> <li>- Isolation</li> <li>- Luft-/Kriechstrecken</li> <li>- Stecker</li> <li>- Modulordnung</li> <li>- Funktionsgruppen</li> <li>- SMD-Bauteile</li> <li>- Bauteilverfügbarkeit</li> <li>- Zugänglichkeit</li> <li>- Austausch</li> </ul>	<b>Einkauf</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Make-or-Buy-Strategie</li> <li>- A-Lieferanten</li> <li>- Local-Content</li> <li>- Katalogbaugruppen</li> <li>- operativer / strategischer Einkauf</li> <li>- Datenaustausch</li> </ul>	<b>Instandhaltung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wartungsfreiheit bzw. Anzahl und Zeitbedarf der Wartung</li> <li>- Inspektion</li> <li>- Austausch und Instandsetzung</li> <li>- Reinigung</li> <li>- Schmierung</li> <li>- Einsatzort</li> </ul>	
<b>Energie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leistung</li> <li>- Verlust</li> <li>- Wirkungsgrad</li> <li>- Zustandsgrößen:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Druck</li> <li>• Temperatur</li> </ul> </li> <li>- Erwärmung</li> <li>- Kühlung</li> <li>- Anschlussenergie</li> <li>- Speicherung</li> <li>- Arbeitsaufnahme</li> <li>- Energieumformung</li> </ul>	<b>Software</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Integration</li> <li>- Schnittstellen</li> <li>- Updates</li> <li>- Hardware</li> <li>- Testbarkeit</li> <li>- Notbetrieb</li> </ul>	<b>Fertigung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einschränkung durch Produktionsstätte</li> <li>- größte herstellbare Abmessung</li> <li>- bevorzugtes Fertigungsverfahren</li> <li>- Fertigungsmittel</li> <li>- mögliche Qualität und Toleranzen</li> </ul>	<b>Recycling</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wiederverwendung</li> <li>- Entsorgung</li> <li>- Endlagerung</li> <li>- Beseitigung</li> <li>- Schad- und Gefahrstoffe</li> <li>- recyclingkritische Stoffe</li> <li>- Zugänglichkeit</li> <li>- Lösbarkeit</li> </ul>	
<b>Signal</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ein- und Ausgangssignale</li> <li>- Anzeigeart</li> <li>- Betriebsgeräte</li> <li>- Überwachungsgeräte</li> <li>- Signalform</li> </ul>	<b>Sicherheit</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unmittelbare Sicherheitstechnik</li> <li>- Mittelbare Sicherheitstechnik</li> <li>- Hinweisende Sicherheitstechnik</li> <li>- Betriebssicherheit</li> <li>- Arbeitssicherheit</li> <li>- Umweltsicherheit</li> <li>- Gefährdungspotential</li> <li>- Grenzrisiko</li> <li>- Risikobewertung</li> </ul>	<b>Kontrolle</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mess- und Prüfmöglichkeit</li> <li>- besondere Vorschriften (z. B. TÜV, DIN, ISO)</li> </ul>	<b>Transport</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Begrenzung durch Hebezeuge</li> <li>- Bahuprofil</li> <li>- Transportwege nach Größe und Gewicht</li> <li>- Versandart und -bedingungen</li> <li>- Lieferzeit</li> </ul>	
<b>Geometrie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abmaße / Dimensionen</li> <li>- Durchmesser</li> <li>- Bauraum</li> <li>- Anzahl</li> <li>- Anordnung</li> <li>- Anschluss</li> <li>- Erweiterung</li> </ul>	<b>Montage</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- besondere Montagevorschriften</li> <li>- Zusammenbau</li> <li>- Einbau</li> <li>- Baustellenmontage</li> <li>- Fundamentierung</li> <li>- Werkzeuge</li> <li>- Hilfsstoffe</li> <li>- Sicherheitsdatenblätter</li> </ul>	<b>Gebräuch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geräuscharmut</li> <li>- Verschleißrate</li> <li>- Anwendung und Absatzgebiet</li> <li>- Einsatzort (z. B. schwefelige Atmosphäre, Tropen, ...)</li> <li>- Feuchtigkeit</li> <li>- Dienstleistung</li> </ul>		
<b>Mechanik</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gewicht</li> <li>- Last</li> <li>- Kräfte:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• statisch</li> <li>• dynamisch</li> </ul> </li> <li>- Reibung</li> <li>- Wärmespannung</li> <li>- Stabilität</li> <li>- Festigkeit:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verformung</li> <li>• Steifigkeit</li> </ul> </li> <li>- Kinematik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewegungsart und -richtung</li> <li>• Beschleunigung</li> <li>• Geschwindigkeit</li> </ul> </li> <li>- Kinetik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Federeigenschaften</li> <li>• Resonanzen</li> </ul> </li> </ul>	<b>Ergonomie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mensch-Maschine-Beziehung</li> <li>- Anzeige und Bedienelemente:           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bedienung</li> <li>• Bedienungsart</li> <li>• Übersichtlichkeit</li> <li>• Beleuchtung</li> </ul> </li> <li>- Anthropometrische Maße</li> <li>- Bedienkräfte</li> <li>- Taktile Kodierung</li> <li>- Haptik</li> </ul>	<b>Organisation</b>	<b>Planung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- max. zulässige Herstellkosten</li> <li>- Werkzeugkosten</li> <li>- Investition</li> <li>- Amortisation</li> <li>- Ende der Entwicklung</li> <li>- Liefertermin</li> <li>- Netzplan für Zwischenschritte</li> <li>- Pönalen</li> <li>- Unternehmens-Know-how</li> </ul>	<b>Nachhaltigkeit</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Öko-Bilanz</li> <li>- Energieeffizienz</li> <li>- Systemkosten</li> </ul>
				<b>Markt</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wettbewerber</li> <li>- Kundensegmente</li> <li>- Kundenverhalten und -bedürfnisse</li> <li>- marktüblicher Standard</li> <li>- Verkaufszahlen</li> <li>- Trends</li> </ul>

**Abb. 6.18** Hauptmerkmalliste

- Was kann mit dem Produkt passieren? Zum Beispiel: In welchen Zustand kann es geraten? Wie kann es behandelt/benutzt werden? Wer kann es benutzen, mit ihm in Berührung kommen? Wo könnte es eingesetzt werden?
- Wie soll das Produkt darauf reagieren? Welche Fehlertoleranz ist gewünscht? Wie kann Gefährdung ausgeschlossen werden?

Aus den Antworten zu den einzelnen Fragen werden dann Produktanforderungen abgeleitet. Die Fragen und damit auch die Szenarien werden für eine detailliertere Betrachtung in positive und negative Szenarien unterteilt. Positive Szenarien werden verwendet, um die möglichen Funktionalitäten des Produkts zu ermitteln. Mit Hilfe der negativen Szenarien sollen mögliche Fehlverhalten und damit Sicherheitsaspekte des Produkts analysiert werden. Aus den ermittelten Fehlverhalten des Produkts können Erkenntnisse für die Erstellung der System-FMEA gewonnen werden.

Zur Erstellung von detaillierten Szenarien kann die Hauptmerkmalsliste verwendet werden. Der Vorteil bei der Kombination der beiden Methoden ist, dass auf der einen Seite die Hauptmerkmalsliste als eine Art Checkliste verwendet werden kann, um wichtige Aspekte in den Szenarien nicht unberücksichtigt zu lassen, und auf der anderen Seite fördert eine ganzheitliche Betrachtung in Szenarien das Verständnis für die Hauptmerkmalsliste. Hierdurch ist eine detaillierte Ermittlung der Anforderungen möglich.

**Das perspektivenbasierte Lesen** Eine in der Informatik gängige Methode zur Ermittlung von Anforderungen aus Dokumenten ist das perspektivenbasierte Lesen (Pohl 2008). Hierbei wird ein Dokument aus einer zuvor festgelegten Perspektive gelesen, z. B. aus der Perspektive des Anwenders. Der Entwickler ignoriert alle Details im Dokument, die für die definierte Perspektive nicht relevant sind. Die Fokussierung auf eine Perspektive führt zu nachweislich verbesserten Ergebnissen bei der Analyse von Dokumenten (Pohl 2008).

Bei einem vorhandenen Inhaltsverzeichnis in einem Dokument bietet sich das Top-Down-Lesen an. Hierbei werden im Inhaltsverzeichnis nach Hinweisen auf Inhalte für die betrachtete Perspektiven gesucht, anstatt ein Dokument sequenziell von Beginn an zu lesen. Parallel zum Lesen des Dokuments erfolgt die Dokumentation der gefundenen Anforderungen (Pohl 2008). Dabei ist es ratsam, die relevanten Textpassagen nachvollziehbar zu kennzeichnen, um eine spätere Überprüfung zu gewährleisten. Das perspektivenbasierte Lesen bietet sich für die Ermittlung der Anforderungen aus Dokumenten, wie z. B. Gesetzestexte, Richtlinien oder Normen, an.

**Detailierungsmethode** Die Detailierungsmethode nach (Kramer und Kramer 1997) eignet sich für eine systematische Konkretisierung der zum Teil sehr unspezifischen Anforderungen in lösungsbestimmende oder gestalterische Produktparameter. Dabei wird eine Anforderung durch die zwei Transformationsschritte Vertiefung und Präzisierung in konkrete Anforderungen überführt. Der Entwickler wird dazu angeregt, die meist abstrakten und nicht eindeutig formulierten Anforderungen in verständliche und ohne Weiteres umsetzbare Anforderungen zu überführen. Diese Methode wird am Beispiel der Anforderung



**Abb. 6.19** Detaillierungsmethode (in Anlehnung an Kramer und Kramer 1997)

„einfache Wartung“ dargestellt (s. Abb. 6.19) (Kramer und Kramer 1997). In der zweiten Stufe wird analysiert, welche Aspekte für eine einfache Wartung berücksichtigt werden müssen. In diesem Fall sind es „lange Wartungsintervalle vorsehen“, „schnelle Zugänglichkeit zu den Komponenten ermöglichen“ und „Arbeitsvorgänge leicht erlernbar machen“. In der dritten Stufe werden diese Aspekte weiter detailliert.

**Die Prototypenbeobachtung (zur Abstimmung der Anforderungen mit dem Kunden)**  
 Die bisher erläuterten Methoden werden vornehmlich vom Entwickler angewendet, um die für die Produktentwicklung in Frage kommenden Anforderungen zu ermitteln. Ob diese Anforderungen tatsächlich den Bedürfnissen des Kunden entsprechen, kann nicht ohne Weiteres beantwortet werden. Hierzu müssen diese Anforderungen mit dem Kunden abgestimmt werden, da sonst die in der Praxis häufig vorkommende Gefahr des „Over-Engineerings“ besteht.

Für eine frühe Überprüfung der Anforderungen durch den Kunden bietet sich die Anwendung von Prototypen an. Unter einem Prototyp werden alle Arten von Produktkonzepten verstanden, die genutzt werden, um die Funktionalität des zu entwickelnden Produkts zu demonstrieren. Als Prototypen werden physische Modelle des Produktkonzepts, bestehende Produkte, in der das zu entwickelnde Teilkonzept bereits realisiert ist, und virtuelle Modelle des Produktkonzepts verwendet. Der Vorteil bei der Nutzung von physischen Prototypen ist, dass sie angefasst und ausprobiert werden können und damit für den Kunden erlebbar sind. Aus dem Unterschied zwischen den Erwartungen und dem Erlebten kann der Kunde neue Anforderungen formulieren und existierende Anforderungen präzisieren oder verändern, da er seine Tätigkeiten während der Benutzung des Prototyps detaillierter beschreiben kann (Pohl 2008). Mittlerweile ist es mithilfe der Erweiterten Realität (auch Augmented Reality oder Mixed Reality genannt) möglich, auch virtuelle Prototypen mit mehreren Sinnen erlebbar zu machen.

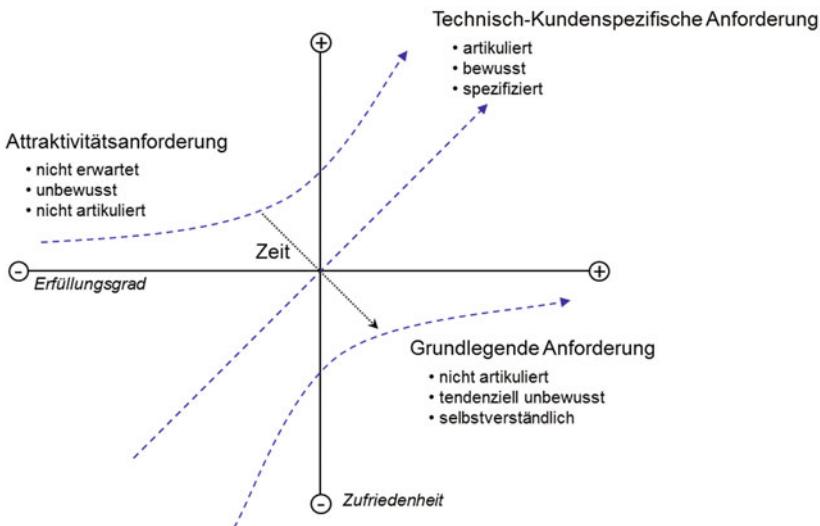
Mit Hilfe der Prototypen kann eine wirkungsvolle personenorientierte Untersuchung durchgeführt werden. Bestimmte Personengruppen, wie z. B. ältere Menschen, können dabei analysiert werden, wie sie mit dem Produkt umgehen und welche Probleme sich dabei ergeben. Hierdurch kann eine Beurteilung zum Konzept und damit die Umsetzung der Anforderung in ihrer Gesamtheit erfolgen. Zudem können aus diesen Erkenntnissen auch weitere wichtige und vor allem konkrete Anforderungen abgeleitet werden. Somit kann diese Methode sowohl zur Ermittlung als auch zur Validierung verwendet werden.

Die Art des Prototyps entscheidet über den Aufwand für seine Erstellung. So können einfache physische Papier- oder Holzmodelle mit geringerem Aufwand realisiert werden als Rapid Prototyping- oder Virtual-Reality-Modelle, die in der Regel einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand erfordern.

### 6.2.3.3 Priorisierung von Anforderungen

In der Regel lassen es in einem Unternehmen die finanziellen und zeitlichen Ressourcen nicht zu, alle Anforderungen mit der gleichen Qualität umzusetzen. Eine Priorisierung ist sowohl zur Eliminierung von Konflikten (s. Abschn. 6.2.3.4) als auch zur Berücksichtigung der Anforderungen abhängig von ihrer jeweiligen Bedeutung für den Kunden geeignet. Eine einfache und in der Praxis bewährte Priorisierung ist die Unterteilung der Anforderungen in Forderungen und Wünsche:

- *Forderungen*: Anforderungen, die unter allen Umständen erfüllt werden müssen, d. h. ohne deren Erfüllung die vorgesehene Lösung keinesfalls akzeptabel ist (z. B. bestimmte zu erfüllende Leistungsdaten, Qualitätsforderungen, wie tropenfest oder spritzwassergeschützt usw.). Mindestforderungen sind als solche durch entsprechende Formulierungen (z. B.  $P > 20 \text{ kW}$ ,  $L < 400 \text{ mm}$ ) anzugeben.
- *Wünsche*: Anforderungen, die nach Möglichkeit berücksichtigt werden sollen, evtl. mit dem Zugeständnis, dass ein begrenzter Mehraufwand dabei zulässig ist (z. B. zentrale Bedienung, größere Wartungsfreiheit usw.). Dabei wird empfohlen, die Wünsche u. U. nach hoher, mittlerer und geringerer Bedeutung zu klassifizieren (Roth et al. 1975).



**Abb. 6.20** Anforderungsklassen (in Anlehnung an Kramer und Kramer 1997)

Diese Unterscheidung und Kennzeichnung ist auch für die Beurteilung der noch zu entwickelnden Konzepte notwendig, weil beim Auswählen üblich nach der Erfüllung von Forderungen gefragt wird, während beim Bewerten nur Konzepte in Betracht kommen, die diese bereits erfüllen. Diese Art der Priorisierung kann sinnvoll für spezifische Kunden angewendet werden. Hierbei ist es entscheidend, die Forderungen des Kunden zu erfüllen. Für die Erfüllung der Wünsche ist der Kunde in der Regel zwar nicht bereit, einen erhöhten Preis zu bezahlen, aber hierdurch kann sich ein Unternehmen gegenüber seinen Wettbewerbern absetzen.

Für die Priorisierung der Anforderungen von anonymen Kunden ist die Aufteilung in Forderungen und Wünsche nicht zielführend, da der Kunde meist keine genauen Vorstellungen über das gesamte Produkt hat. Hierfür hat sich die Klassifizierung nach Kano als praxistauglich erwiesen. In Anlehnung an Kano leitet Kramer drei grundsätzliche Klassen von Anforderungen ab (Kramer und Kramer 1997), s. Abb. 6.20.

### 1. Grundlegende Anforderungen

Bei ihnen handelt es sich meist um implizite Anforderungen, d. h. sie werden vom Kunden nicht ausgesprochen. Ihre Erfüllung wird als selbstverständlich betrachtet und ist für den Kunden von höchster Bedeutung. Das Nichtberücksichtigen dieser Anforderungen verringert die Kundenzufriedenheit beträchtlich. Deshalb ist es für die Entwicklungsabteilung von eminenter Bedeutung, diese Anforderungen zu erkennen. Der Airbag in einem Kraftfahrzeug ist z. B. eine grundlegende Anforderung. Diese sind häufig aber nur die notwendige Bedingung für ein erfolgreiches Produkt. Zur Identifizierung dieser Anforderungen müssen

die Erwartungen des Kunden durch den Vertrieb oder das Produktmanagement ermittelt werden.

## 2. Technisch-kundenspezifische Anforderungen

Hierbei handelt es sich um explizite Anforderungen. Sie werden vom Kunden genannt und können meistens genau spezifiziert werden: ein Motor soll 15 kW Leistung haben und maximal 40 kg wiegen. Aufgrund dieser konkreten Angaben benutzt der Kunde diese Werte zum Vergleich mit Wettbewerberprodukten. Die Wertigkeit der einzelnen Größen wird im Allgemeinen vom Kunden selbst bestimmt. Wird diese Anforderung nicht berücksichtigt, verringert sich ebenfalls die Kundenzufriedenheit. Jedoch steigt sie proportional mit der Anzahl der berücksichtigten technisch-kundenspezifischen Anforderungen.

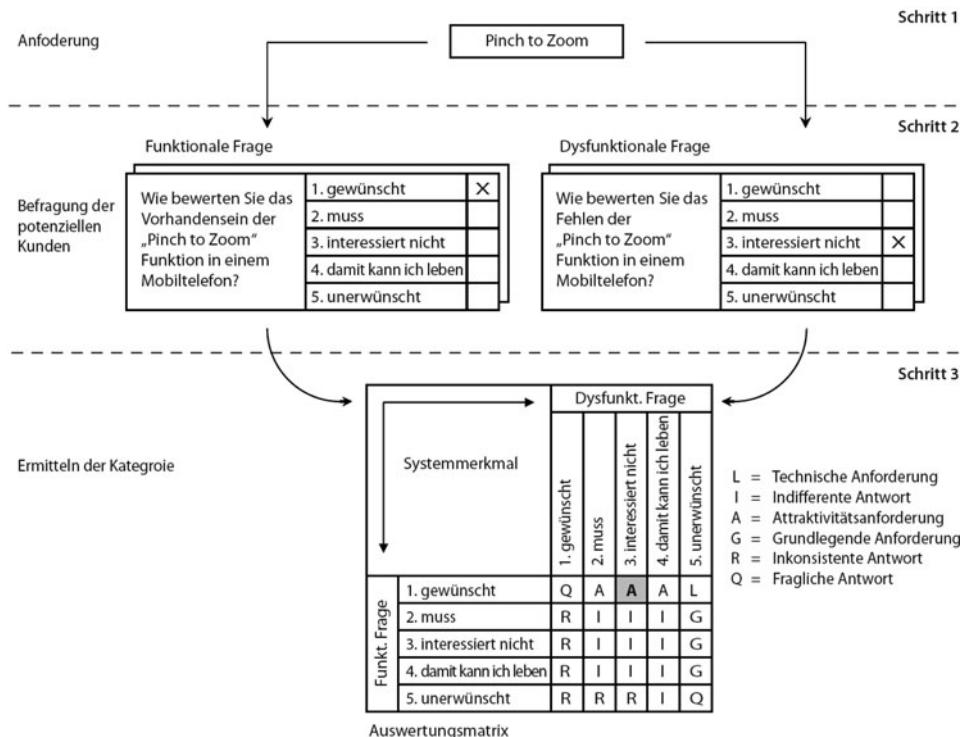
## 3. Attraktivitätsanforderungen

Hierbei handelt es sich auch um implizite Anforderungen. Sie sind dem Kunden häufig selbst nicht bewusst, können aber meistens sehr gut zur Differenzierung von Wettbewerbern genutzt werden, da hierdurch die Kundenzufriedenheit überproportional gesteigert werden kann. Das Nichtberücksichtigen von Attraktivitätsanforderungen verringert nicht die Kundenzufriedenheit. Bei einem PKW können z. B. der Parkassistent und automatisches Abblenden des Fernlichts bei Gegenverkehr diesen Anforderungstyp bilden.

Für die Festlegung, zu welcher der drei Klassen eine Anforderung gehört, ist eine fundierte Kenntnis über den Markt erforderlich. Meist wird diese Einordnung aufgrund der Erfahrung der Entwickler oder des Vertriebs vorgenommen. Pohl zeigt eine Vorgehensweise zur systematischen Einteilung der Anforderungen in die drei Klassen (Pohl 2008). In Abb. 6.21 wird diese Vorgehensweise dargelegt. In diesem Beispiel soll ermittelt werden, zu welcher Anforderungsklasse die Anforderung nach der Funktionalität „Pinch to Zoom“, die das Vergrößern und Verkleinern mit zwei Fingern bei Mobiltelefonen erlaubt, gehört. Zur Einordnung dieser Anforderung werden die zugehörigen funktionalen und die dysfunktionalen Fragen (s. Abb. 6.21) formuliert und damit die potenziellen Kunden (Lead User) befragt. Aufgrund der genannten Antworten wird das zugehörige Feld in der Auswertungsmatrix identifiziert. Aus dem Feld kann abgeleitet werden, zu welcher Klasse die Anforderung gehört. In dem Beispiel stellt die Anforderung eine Attraktivitätsanforderung dar.

### 6.2.3.4 Zielkonflikte

Bei den Anforderungen der unterschiedlichen Stakeholder wird es nicht zu vermeiden sein, dass es zu Konflikten zwischen diesen kommt. Dabei gibt es unterschiedliche Formen des Konflikts. So können Konflikte entstehen, wenn z. B. der Kunde gegensätzliche Forderungen an das Produkt stellt. Solche Konflikte werden als Sachkonflikte bezeichnet. Ein Beispiel hierfür ist die Forderung nach geringem Kraftstoffverbrauch und hoher Leistung bei einem Kraftfahrzeug. Sachkonflikte werden zum größten Teil durch einen Mangel an Informationen oder durch unterschiedliche Interpretationen eines Sachverhalts verursacht. Deshalb



**Abb. 6.21** Klassifizierung der Anforderungen

muss festgestellt werden, ob tatsächlich ein Konflikt vorliegt. Dies kann durch die Kommunikation mit dem Kunden geschehen. Die Sachkonflikte sind nicht notwendigerweise negativ. So können diese auch als Quelle für neue Ideen sowie für die Entwicklung von innovativen Lösungen dienen.

Eine weitere Konfliktart stellen die Interessenskonflikte dar. Diese entstehen aus gegensätzlichen Forderungen der verschiedenen Stakeholder. So gibt es in vielen Fällen Konflikte zwischen den Anforderungen des Kunden und den gesetzlichen Rahmenbedingungen.

Nicht oder zu spät aufgelöste Konflikte gefährden die Akzeptanz des Produkts. Das Ziel des Konstrukteurs ist die frühzeitige Identifizierung der möglichen Konflikte und ihre Auflösung. Durch eine qualitativ hochwertige Beschreibung der Anforderungen sollen Konflikte, die durch die unterschiedlichen Interpretationen entstehen, minimiert werden. Deshalb wird im folgenden Abschnitt eine Methode vorgestellt, wie Anforderungen möglichst eindeutig zu beschreiben sind.

### 6.2.3.5 Anforderungsbeschreibung

Für eine qualitativ hochwertige Beschreibung der Anforderungen sollten folgende Qualitätskriterien berücksichtigt werden:

- *Korrektheit:* Die Anforderung beschreibt vollständig das wirkliche Bedürfnis des Kunden (Stakeholder).
- *Eindeutigkeit:* Die präzise Beschreibung der Anforderungen führt zu keinen Missverständnissen.
- *Umsetzbarkeit:* Die Anforderung muss realisierbar sein.

Die natürlichsprachliche (informelle) Beschreibung der Anforderungen wird häufig für das Beschreiben der Anforderungen verwendet. Sie hat den Vorteil, dass sie durch den Entwickler aufgrund ihrer universellen und flexiblen Eigenschaften leicht angewendet werden kann. Aber die informelle Beschreibung führt zu einer Mehrdeutigkeit der Anforderungen. Die Folge ist, dass die Anforderungen durch verschiedene Personen unterschiedlich interpretiert werden. Damit werden die Qualitätskriterien nicht erfüllt. In der Praxis gibt es mehrere Ansätze zur Formalisierung und damit zur qualitativ hochwertigen Beschreibung der Anforderungen (vgl. Pohl 2008).

Ein in der Praxis bewährter Formalisierungsansatz zur Anforderungsbeschreibung ist das von dem Verband der Automobilindustrie (VDA) vorgeschlagene syntaktische Satzbaumuster (VDA 2006). Durch die Festlegung der syntaktischen Muster für Anforderungen sollen Fehler durch eine standardisierte Formulierung von Beginn an minimiert werden. Syntaktische Satzbaumuser bauen auf den folgenden Satzbaugliedern auf:

- *Bedingung:* Bedingung ist eine optionale Komponente und beschreibt u. a. zeitliche Aspekte, Zustände des Systems oder der Außenwelt.
- *Subjekt:* Als Subjekt wird das ausführende Element, wie z. B. das System, das Teilsystem oder der Anwender beschrieben.
- *Anforderungswort:* Anforderungswort ist eine optionale Komponente und beschreibt die Bedeutung einer Anforderung.
- *Objekt:* Als Objekte werden passive Elemente beschrieben, die an einer Aktion beteiligt sind.
- *Aktion:* Die Aktion wird durch ein Verb beschrieben.

Für die praktische Anwendung hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Verwendung der Satzbauglieder in ihrer Reihenfolge flexibel anzuwenden, um auch den grammatischen Zwängen der Sprache gerecht zu werden (Nagarajah 2011). Die Methode wird an dem folgenden Beispiel verdeutlicht:

*Bei der Demontage der Motorhaubenschließsystem-Komponenten dürfen die Befestigungselemente die Karosserie nicht beschädigen.*

Bedingung	<i>Bei der Demontage der Motorhaubenschließsystem-Komponenten</i>
Anforderungswort	<i>dürfen</i>
Subjekt	<i>die Befestigungselemente</i>

---

Objekt	<i>die Karosserie</i>
Aktion	<i>nicht beschädigen</i>

Um die Eindeutigkeit zu erhöhen, wird empfohlen, ein Glossar über die im Unternehmen verwendeten Begriffe anzulegen, um zu verhindern, dass Begriffe unterschiedlich interpretiert werden.

Ein weiteres wichtiges Merkmal einer guten Anforderungsbeschreibung ist die Nutzung von eindeutigen Wörtern. Wörter, wie z. B. „leicht“ oder „eher“, können nicht eindeutig ausgelegt werden und verstossen somit gegen die Qualitätskriterien. Eine große Auswahl von möglichst nicht zu verwendenden Begriffen ist in VDA 2006 gegeben.

## 6.2.4 Weitere Aspekte und Praxis

Ein wichtiges Thema in der Praxis ist die nachvollziehbare Dokumentation und Verwaltung von Anforderungen und ihren Änderungen. In diesem Unterabschnitt werden mögliche Gründe für die Änderung von Anforderungen und einige in der Praxis verwendete Tools zur Verwaltung der Anforderungen dargelegt.

### 6.2.4.1 Änderungen von Anforderungen erfassen und verwalten

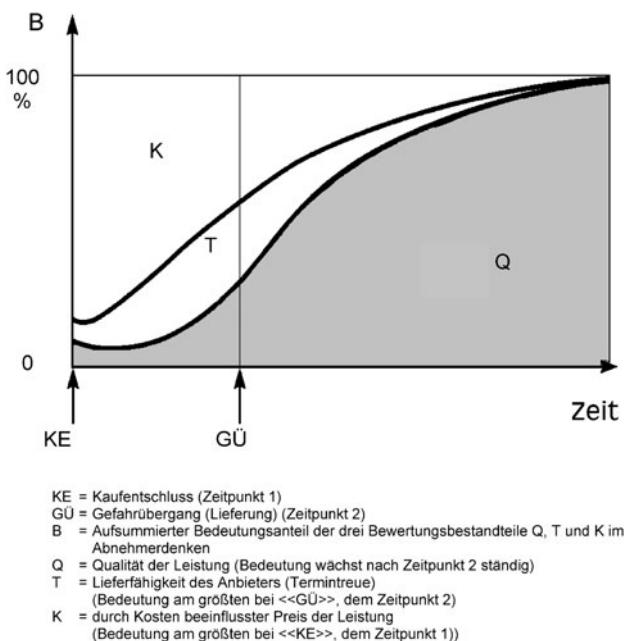
Die Anforderungen an ein Produkt sind in vielen Fällen zeitlichen Änderungen unterworfen. Dies kann zwei Gründe haben:

- *während der Produktentstehungsphase*: Der Kunde ändert seine Wünsche oder Forderungen während der Produktentstehung. Durch neue Erkenntnisse beim Kunden oder die Erweiterung des geplanten Produkteinsatzes kommen solche Änderungen in der Praxis relativ häufig vor. Typisch ist dies bei Investitionsgütern, deren Entwicklung sich über einen längeren Zeitraum erstreckt. Beispielsweise kann bei Schienenfahrzeugen durch eine während der Zeit der Fahrzeugentwicklung entstandene Streckenerweiterung die Antriebsleistung oder Kapazität der Fahrzeuge nicht mehr ausreichen.
- *während der Produktnutzung*: Die Einstellung zu einem Produkt und damit auch die Anforderungen können sich durchaus im Laufe der Produktnutzung ändern bzw. ihre Gewichtung ändert sich. Die Bedeutung der Anforderungen an die Qualität, z. B. Wartungsintervalle oder Verfügbarkeit des Produkts, nimmt mit seiner Nutzungsdauer beim Kunden im Allgemeinen zu, s. Abb. 6.22 (Kramer und Kramer 1997). Diese Änderungen sollten für die Entwicklung eines Folgeprodukts berücksichtigt werden. Hierdurch kann der Kunde an das Unternehmen gebunden werden.

### 6.2.4.2 Änderungsmanagement von Anforderungen

Die Dynamik der Anforderungen stellt eine große Herausforderung an das Verwalten der Anforderungsliste dar. Das Ziel des Änderungsmanagements ist die konsistente Verwaltung der Anforderungsänderungen. Dabei ist es nicht nur wichtig, die aktuellen Änderungen

**Abb. 6.22** Bedeutungswandel der Ausführungsqualität durch den Kunden (Kramer und Kramer 1997)



einzupflegen, sondern auch die Begründung für die Änderung zu dokumentieren, um eine Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Zudem muss ermöglicht werden, dass den verschiedenen Abteilungen im Unternehmen die Möglichkeit gegeben wird, die Anforderungen zu überprüfen und ggf. weitere Änderungen einzupflegen. Dies setzt sowohl ein abteilungsübergreifendes Tool als auch einen definierten Workflow für das Einpflegen von Änderungen voraus.

Anforderungsänderungen, die sich aus der Nutzungsphase des Produktes ergeben, sollten für die Weiterentwicklung des Produktes verwendet werden. Leider sind in der Praxis die konsistente Dokumentation und das Zugreifen der Anforderungsänderungen aus dem Betrieb durch die Entwicklungsabteilung nur bedingt gegeben. Das Verwenden von unterschiedlichen Systemen zur Datenverwaltung (PDM, ERP, CRM usw.) in den einzelnen Produktlebensphasen verhindert eine durchgängige Informationsweitergabe. Für weitere Information zu diesem Thema wird auf das Werk von Hood 2005 verwiesen.

#### 6.2.4.3 Tools

In der Praxis ist die Verwaltung von Anforderungen ohne die Unterstützung von Softwaretools kaum durchführbar. Selbst für ein rein mechanisches Produkt, wie z. B. ein PKW-Motorhaubenschließsystem, liegt die Anzahl von explizit erfassten Anforderungen im vierstelligen Bereich. Würde man in diesem Fall die Anforderungen in Papierform dokumentieren, wäre z. B. das Erkennen von Abhängigkeiten der Anforderungen, das Einpflegen von Änderungen und das Aktualisieren des Dokuments bei einer Produktentwicklung über verteilte Standorte nicht sinnvoll realisierbar.

In kleineren Unternehmen werden die Anforderungslisten mit Office-Anwendungen, wie z.B. Microsoft Word, erstellt. Der Vorteil dieser Systeme ist, dass sie dem Anwender bekannt sind und damit eine schnelle und kostengünstige Einarbeitung möglich ist. Der Nachteil dieser Anwendungen ist aber auch, dass eine effiziente Verwaltung der Anforderungen nur bedingt möglich ist.

Auf dem Markt sind spezielle Softwaretools verfügbar, welche eine praxistaugliche Verwaltung der Anforderungen erlauben. In größeren Unternehmen wird hierzu das Softwaretool IBM Rational DOORS genutzt. Anforderungen werden in DOORS als Objekte verwaltet und in beliebig strukturierbare Dokumente eingeordnet. Sowohl die Beziehungen der Anforderungen als auch die Änderungen können mit diesem Tool dokumentiert werden. Zudem bietet es u. a. eine Schnittstelle zu Microsoft Word, wodurch bei Bedarf die Anforderungslisten in einer festgelegten Form ausgeleitet werden können.

---

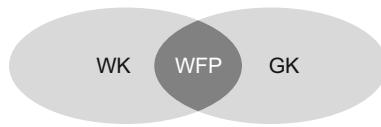
### 6.3 Erstellung eines Konzepts für das Produkt (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Das Konzept eines Produkts lässt die von einem Produkt zu erfüllenden Funktionen erkennen und beschreibt mit welchen Hilfsmitteln, den Funktionsträgern, diese erfüllt werden sollen. Es ist also ein Abbild der Produktarchitektur, vgl. Teil 1 des Buches. Es gibt den prinzipiellen Aufbau und den prinzipiellen Zusammenhang der Haupt- und, wenn notwendig, auch der Nebenelemente des Produkts untereinander wieder. Gleichzeitig legt es grundsätzliche gestalterische Aspekte fest. Wegen dieser grundsätzlichen Bestimmung der wesentlichen Elemente des Produkts und ihres Zusammenhangs untereinander kommt dem Konzept höchste Bedeutung zu. Fehler im Konzept können später gar nicht oder nur mit größtem Aufwand korrigiert werden.

Neben dem funktionalen Aspekt besteht das Konzept aus zwei Teilkonzepten, dem Wirkkonzept und dem Gestaltungskonzept. Beide sind über Wirkflächen miteinander verbunden.

- *Wirkkonzept (WK)*: Es wird zuerst festgelegt und gibt die zur Funktionserfüllung gewählten physikalischen Effekte und deren Verknüpfung untereinander, die prinzipiellen Werkstoffarten (Effektträger) sowie die Gestaltung der *Wirkflächen (WF)* wieder.
- *Wirkflächen (WF)*: An den Wirkflächen wird die Umsetzung der gewählten physikalischen Effekte erzwungen. Dazu wird im Allgemeinen ein Wirkflächenpaar (WFP), also zwei Wirkflächen, die miteinander korrespondieren, benötigt.
- *Gestaltungskonzept (GK)*: Es legt die Hauptabmessungen und -gestaltung sowie die Zuordnung der Elemente eines Produkts untereinander unter Berücksichtigung des Hauptflusses und evtl. Nebenflüsse fest (vgl. Teil 3).

In Abb. 6.23 ist dieser grundsätzliche Zusammenhang des Wirkkonzepts (WK) mit dem Gestaltungskonzept (GK) über die Wirkflächenpaare (WFP) wiedergegeben.



**Abb. 6.23** Zusammenhang des Wirkkonzepts (WK) mit dem Gestaltungskonzept (GK) über die Wirkflächenpaare (WFP)

Wegen der großen Bedeutung des Konzepts sind vor seiner Erstellung mögliche wesentliche Probleme zu erkennen.

**Erkennen wesentlicher Probleme** Beim Entwickeln und Konstruieren besteht meistens ein Dilemma. Bekanntes und Bewährtes gibt Sicherheit. Es besteht aber die Gefahr, die Chancen von neuen und besseren Technologien und Lösungen nicht auszuschöpfen. Diese bergen aber wiederum ein Risiko zu scheitern. Eine klare Definition der hinter einem neuen Produkt stehenden Ziele kann helfen, dieses Dilemma aufzulösen. Dazu müssen aber auch die wesentlichen Probleme und damit Risiken erkannt werden. Dabei ist es hilfreich zu abstrahieren. Beim Abstrahieren wird vom Individuellen und vom Zufälligen abgesehen, um das Allgemeingültige und Wesentliche zu erkennen und so den Kern der Aufgabe zu beschreiben. Dies kann beispielsweise in Form eines möglichst prägnanten Satzes erfolgen, wie „Der Rasen soll eine vorgegebene Länge nicht überschreiten“. Diese lösungsneutrale Formulierung lässt genügend Freiraum für sehr unterschiedliche Lösungsansätze, wie mechanisches Kürzen durch Mähen oder Verhinderung des Wachstums auf biologisch/chemische Weise, und macht die Aufgabe deutlich. Zur Eingrenzung des Lösungsfeldes ist die Angabe und Definition möglicher Rahmenbedingungen wichtig. In dem Beispiel könnten diese wie folgt aussehen:

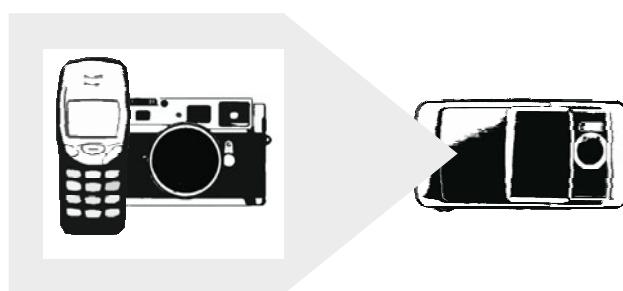
- Bedienung durch eine Person,
- Rasenflächen von 50 bis 1.000 m<sup>2</sup> und
- Einsetzbar bei jedem Wetter.

Diese Aufzählung verdeutlicht, wie wichtig auch die Anforderungsliste bei diesem Schritt ist. Es sollen nur die für die Lösung wesentlichen Einflüsse genannt werden.

In der industriellen Praxis werden diese Überlegungen im Allgemeinen bei Aufgaben gemacht, die mit den vorhandenen Produkten nicht mehr erfüllt werden können. Die zu lösende Aufgabe liegt also nicht mehr oder überwiegend nicht mehr im Erfahrungsfeld des Unternehmens. Hier besteht die Gefahr, dass durch eine zu geschlossene Aufgabenformulierung, im Wesentlichen also die Anforderungsliste, die mögliche Anwendungsbreite des Produkts beschränkt wird. Eine solche Vorfixierung muss aufgelöst werden.

Abbildung 6.24 zeigt ein Beispiel, wie eine Aufgabenerweiterung eines Produktes durch die Infragestellung bisheriger Erfahrungen des Unternehmens erreicht werden kann. In einem solchen Fall ist es hilfreich, die Kompetenzen des Unternehmens anwendungsneutral zu beschreiben, wie z. B.

**Abb. 6.24** Erweiterte Produktfunktionalität aufgrund erweiterter Aufgabenbeschreibung



- elektronische Baugruppen hoch zu integrieren,
- Hardwarekomponenten verschiedener Lieferanten softwaretechnisch zu integrieren,
- für das Unternehmen neue Technologien, hier die Kameraoptik, zu adaptieren
- usw.

Eine Voraussetzung für die mögliche Umsetzung des Beispiels aus Abb. 6.24 war die Miniaturisierung von Baugruppen. Zusätzlich musste aber Sinnfälligkeit der Integration zweier offenbar völlig unterschiedlicher Produkte erkannt werden. Bei näherer Analyse wird deutlich, dass beide ursprünglichen Produkte, die Digitalkamera und das Mobiltelefon, technologisch verwandt sind und viele gemeinsame Baugruppen nutzen können.

Eine weitere wichtige Quelle zum Erkennen der wesentlichen Probleme und Aufgaben stellt die Anforderungsliste dar. Bei ihrer Erstellung mussten sich die Beteiligten bereits sehr intensiv mit der Aufgabe und ihren Rahmenbedingungen befassen. Es ist also entsprechendes Wissen im Unternehmen vorhanden. Dieses Wissen kann zusammen mit dem Inhalt der Anforderungsliste zur Problemdefinition genutzt werden. Dazu ist folgendes Vorgehen bezogen auf die Analyse der Anforderungsliste zweckmäßig:

- Gedanklich Wünsche weglassen,
- nur noch Forderungen berücksichtigen, die die Funktionen und wesentlichen Bedingungen unmittelbar betreffen,
- quantitative Angaben in qualitative umsetzen und dabei auf die wesentlichen Aussagen reduzieren,
- Erkanntes sinnvoll erweitern und
- Problem lösungsneutral formulieren.

Das so lösungsneutral formulierte Problem ist ein wichtiges Ergebnis bei der Lösungserarbeitung. Es kann als Zweck oder Hauptaufgabe des Produktes betrachtet werden und stellt den Startpunkt für die Lösungserarbeitung dar.

### 6.3.1 Funktionale Beschreibung des Produkts

Bereits im ersten Teil dieses Buches wurde auf die funktionale Sicht auf ein Produkt eingegangen. Insbesondere der Kunde hat diese Sichtweise, da ihn im normalen Fall die vom Produkt erfüllten Funktionen interessieren und nicht, durch welche technische Lösung diese erfüllt werden. Insbesondere bei Baukasten- und modularen Produkten werden die vom Produkt zu erfüllenden Gesamtfunktionen nach Marktgesichtspunkten festgelegt. Das bedeutet gleichzeitig, dass damit auch die Baugruppenaufteilung und so die Aufteilung der Gesamtfunktion in Teifunktionen sehr früh im Produktentstehungsprozess festgelegt werden.

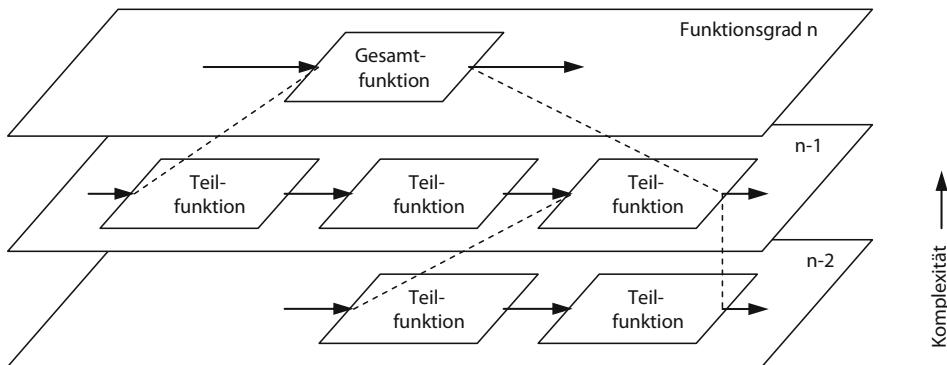
Anders verhält es sich, wenn nicht die o. g., marktgetriebenen Gesichtspunkte die Aufteilung der Gesamtfunktion in die Teifunktionen des Produkts bestimmen. Grundsätzlich sollte neben den bereits o. g. Gründen eine funktionale Betrachtung des zu entwickelnden oder konstruierenden Produkts noch aus weiteren Gründen erfolgen.

Das Aufstellen einer Funktionsstruktur für ein Produkt und ein erstes Aufteilen der Gesamtfunktion in Teifunktionen, zumindest bis zur ersten Ebene, erfordert eine Abstraktion und Konzentration auf die wesentlichen Probleme. Bei dieser Gliederung der Gesamtfunktion wird praktisch zwangsläufig darüber nachgedacht, aus welchen Bereichen, also Teifunktionen, ein Produkt bestehen kann. Da die Aufteilung der Gesamtfunktion in Teifunktionen zunächst willkürlich ist, wird der Anwender angeregt, auch alternative Gliederungen der Gesamtfunktionen und damit des Produkts vorzunehmen und zumindest grob zu bewerten. Dieser „spielerische“ Umgang mit der Funktionsstruktur fördert das Verständnis für die Aufgabe und für das Produkt. Die Funktionsstruktur ist also nicht Selbstzweck, und es ist auch kein Ziel, sie in möglichst viele Teifunktionen aufzuteilen. Die Funktionsstruktur ist lediglich ein Hilfsmittel, um

- wesentliche Probleme des Produkts zu erkennen,
- wesentliche Funktionen zu beschreiben,
- mögliche Gliederungen des Produkts aufzuzeigen,
- z. B. mit dem Vertrieb oder dem Produktmanagement mögliche Bausteineinteilungen für ein Baukastenprodukt diskutieren zu können und
- die funktionale Beschreibung der Produktarchitektur abbilden zu können.

Vor diesem Hintergrund muss das Aufstellen einer Funktionsstruktur betrachtet werden.

**Aufstellen einer Funktionsstruktur** Wie eingangs dieses Abschnitts beschrieben, ist die Abstraktion und Kondensation der Aufgabenstellung auf eine prägnante Aussage ein wichtiger Schritt zur Konzepterstellung. Diese Kondensation der Aufgabenstellung auf möglichst einen Satz oder eine einfache Skizze wird nach Koller (1998) als Zweckbeschreibung oder Zweck bezeichnet. Andere Autoren bezeichnen dieses Ergebnis als Hauptfunktion oder Hauptaufgabe des Produkts. Im mathematischen Sinn bedeutet dies, dass die Aufgabe eines Produktes durch eine eindeutige Festlegung des Zusammenhangs zwischen dem



**Abb. 6.25** Funktionsstruktur entsprechend dem „Input – Output – Modell“

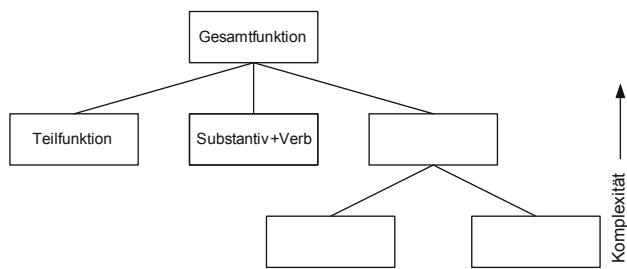
Eingang und dem Ausgang, also dem Hauptfluss des Produkts, beschrieben wird, vgl. Teil 1 des Buches. Diese Hauptfunktion wird dann zweckmäßig in Teilfunktionen untergliedert. Mit „zweckmäßig“ ist dabei die anfangs dieses Abschnitts gemachte Aussage gemeint. Die Teilfunktionen sind untereinander durch den entsprechenden Fluss verbunden und erfüllen so in ihrem Zusammenspiel die Hauptfunktion. Die Funktionsstruktur soll grundsätzlich einfach und eindeutig sein. Der Auflösungsgrad einer Gesamtfunktion, d. h. die Anzahl der Teilfunktions-Ebenen sowie die Zahl der Teilfunktionen je Ebene, wird durch den Neuheitsgrad der Aufgabenstellung, aber auch von der anschließenden Lösungssuche bestimmt. Bei Neuentwicklungen sind im Allgemeinen sowohl die einzelnen Teilfunktionen als auch deren Verknüpfungen unbekannt. Eine Ausnahme bilden hier Baukästen und modulare Produkte, wo ja durch die Produktarchitektur bereits sehr früh im Produktentstehungsprozess die Teilfunktionen nach übergeordneten Kriterien festgelegt werden.

Grundsätzlich gibt es zwei Sichten der Funktionsstruktur (Zhang et al. 2005):

1. die „Input-Output-Sicht“. Hierbei werden der Fluss der Hauptfunktion sowie alle Teilfunktionen im mathematischen Sinn als Funktion betrachtet. Es besteht also jeweils ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße und der Ausgangsgröße einer Funktion.
2. die „hierarchische Sicht“. Ziel bei dieser Sicht ist es, die Komplexität einer Funktion zu verringern und die hierarchische Abhängigkeit der Funktionen untereinander wiederzugeben.

In Abb. 6.25 ist beispielhaft der Aufbau einer Funktionsstruktur nach dem „Input-Output-Modell“ wiedergegeben. In dieser Abbildung wird auch ein Zweck der Funktionsstruktur deutlich, nämlich die Reduktion der Komplexität von Aufgaben. Entsprechend ist die Tiefe der Gliederung einer Funktionsstruktur in einzelne Ebenen, in Abb. 6.25 in zwei Ebenen, abhängig vom Wissens- und Erfahrungsstand des Anwenders bezüglich der Aufgaben.

**Abb. 6.26** Funktionsstruktur entsprechend dem „Substantiv-Verb-Modell“



Das „Input-Output-Modell“ ist insbesondere für Produkte geeignet, bei denen ein Prozessablauf oder der Durchlauf eines Gutes durch das Produkt eine Rolle spielt.

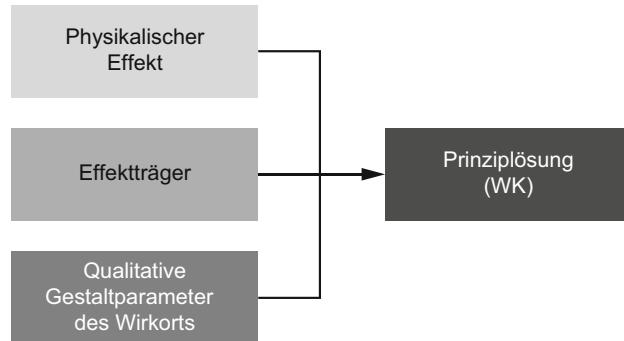
Die zweite Sicht auf eine Hauptfunktion wird auch als „zielorientiertes Modell“ oder „Substantiv-Verb-Modell“ bezeichnet (Zhang et al. 2005). In Abb. 6.26 ist beispielhaft eine Funktionsstruktur entsprechend dem „Substantiv-Verb-Modell“ wiedergegeben.

Dieses Funktionsmodell ist gut geeignet, wenn nicht die Reihenfolge von Ereignissen bei dem Produkt eine Rolle spielt, sondern ihre Abhängigkeit voneinander.

Eine Funktionsstruktur entsprechend dem „Substantiv-Verb-Modell“ kann durch einen „Top-down“-Ansatz, beispielsweise FAST-Methode (Function Analysis System Technique) (VAI 1993), oder mittels eines „Bottom-up“-Ansatzes, z. B. die „Subtract-and-Operate-Methode“ (Otto und Wood 2001), erstellt werden. Verwenden kann man diese beiden Ansätze sowohl für neue als auch für die Überarbeitung oder Analyse vorhandener Produkte im Rahmen eines „reverse-engineerings“. Mit Hilfe der „Subtract and Operate“-Methode werden dabei folgende Schritte zur Aufstellung und Analyse der Funktionsstruktur ausgeführt:

1. Eine Baugruppe oder eine Bauteil wird negiert.
2. Das Produkt wird modellhaft betrieben.
3. Analyse der Auswirkungen der fehlenden Baugruppe oder des fehlenden Bauteils.
4. Ableiten der Teilfunktion der Komponente oder des Bauteils aus Punkt 1 unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Punkt 3.
5. Die Arbeitsschritte 1–5 für alle Baugruppen und/oder Bauteile wiederholt.
6. Aufstellen der hierarchischen Funktionsstruktur entsprechend Abb. 6.26.

Es muss deutlich betont werden, dass die oben beschriebene Erstellung einer Funktionsstruktur oder die Ermittlung einer Funktion einer Baugruppe oder eines Bauteils nur bei bekannten Produkten umsetzbar ist. Ist der Kontext einer Komponente nicht bekannt, so kann meistens auch nicht deren Funktion mit Sicherheit angegeben werden. Dazu ein Beispiel: Bei einer konventionellen Glühlampe werden ca. 95 % der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt, der Rest in Licht. Ein unbedarfter Betrachter würde als Funktion der Glühlampe „heizen“ angeben (Nagarajah und Feldhusen 2009).



**Abb. 6.27** Die drei Hauptkomponenten des Wirkkonzepts

Das Aufstellen einer Funktionsstruktur in der Praxis erfolgt, unabhängig von der Sicht auf die Funktionsstruktur, zweckmäßiger Weise in zwei Hauptschritten. Im ersten Schritt erfolgt eine hierarchische Aufstellung der Funktionen. Hierbei werden die zu erfüllenden Teufunktionen und deren Beziehungen untereinander festgelegt. Im zweiten Schritt werden dann die Verknüpfungen der Teufunktionen durch die Flüsse untereinander bestimmt. Hierbei werden logische und evtl. physikalische Abhängigkeiten deutlich, ohne die Lösungsneutralität zu verlassen.

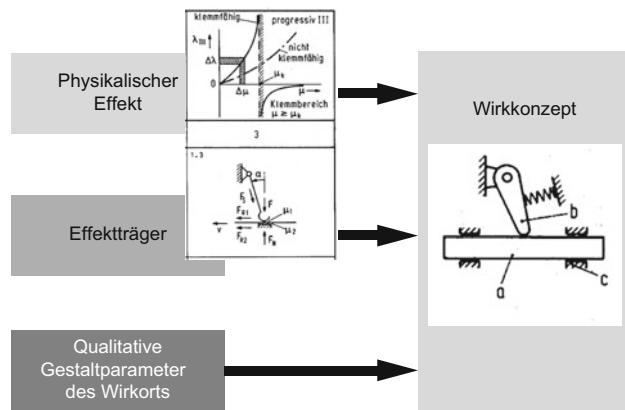
### 6.3.2 Das Wirkkonzept

Nach den Erläuterungen in Abschn. 6.3 besteht das Wirkkonzept aus den in Abb. 6.27 wiedergegebenen Hauptelementen. Dabei ist mit der qualitativen Gestaltung des Wirkorts die Gestaltung der Wirkflächenpaare gemeint.

Die Erstellung des Wirkkonzepts ist der anspruchsvollste Teil der Ingenieursaufgaben im PEP und stellt einen sehr bedeutenden Abschnitt von ihm dar. Aufgrund der genannten grundlegenden Festlegungen und Entscheidungen ist bei diesen Arbeiten eine Fehlentscheidung oder nicht optimale Auswahl der Konzeptkomponenten, s. Abb. 6.27, sehr folgenreich für das Produkt. Insbesondere die Funktionssicherheit, aber auch die einfache Herstellbarkeit wird bereits zu diesem Zeitpunkt sehr stark beeinflusst. Deshalb muss ein Konzept robust sein, damit das Produkt:

- seine Funktion auch bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen sicher erfüllt,
- seine Funktion auch bei schwankender Qualität der Fertigung der Einzelteile und Montage sicher erfüllt und
- möglichst aus einfachen Wirkflächengeometrien, sowohl im Makro- als auch im Mikrobereich, und möglichst wenigen Systemelementen aufgebaut ist.

**Abb. 6.28** Beispiel für ein Wirkkonzept eines Reibgesperres



Ein Beispiel für ein Wirkkonzept ist in Abb. 6.28 wiedergegeben. Hier sollte ein mechanisches, einseitig wirkendes Gesperre entworfen werden. Der verwendete physikalische Effekt ist Reibung unter Nutzung des Prinzips der Selbstverstärkung. Das Prinzip wurde Roth (2001) entnommen.

In Abb. 6.28 stellt die Komponente „b“ das Sperrelement dar, das zusammen mit der Komponente „a“ die einseitig wirkende Sperrfunktion erfüllt. Gelagert ist „a“ in den Lagern „c“. Das Beispiel verdeutlicht den Unterschied zwischen der Skizze des physikalischen Prinzips, wie es in Abb. 6.28 oben links zu sehen ist, und dem Wirkkonzept. Im Wirkkonzept werden alle notwendigen Komponenten in ihrer technischen Ausprägung wiedergegeben, hier speziell die als Prinzip dargestellte elastische Feder zur Erzeugung der Initialkraft. Das Symbol sagt also nicht, dass diese Feder im ausgeführten Entwurf als Schraubenfeder ausgeführt werden muss.

Mit Hilfe des Wirkkonzepts soll also überprüft werden, ob das Produkt seine Funktionen prinzipiell erfüllen kann. Der Detaillierungsgrad des Wirkkonzepts ist deshalb nicht eindeutig oder konstant. Vielmehr hängt er von der Möglichkeit ab, die oben gestellte Frage möglichst eindeutig und sicher beantworten zu können. Aus diesem Grund ist der Übergang vom Wirkkonzept zum Gestaltungskonzept in der Praxis auch häufig fließend. Typischerweise müssen einzelne Wirkflächen schon sehr detailliert gestaltet und z. B. auch bestimmte Beschichtungen für die sichere Funktionserfüllung festgelegt werden, bevor der Rest des Produkts detailliert wird.

### 6.3.3 Erstellen des Wirkkonzepts

Das Erstellen des Wirkkonzepts für ein Produkt wird im Allgemeinen als Entwicklungstätigkeit bezeichnet. Es geht darum, für jede geforderte Funktion des Produkts einen Funktionsträger, also eine Baugruppe oder ein Bauteil grundsätzlich festzulegen. Grundsätzlich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das zu verwendende physikalische Prinzip,

der einzusetzende Werkstoff, zumindest in Form einer Werkstoffgruppe, und die qualitative Geometrie der Wirkflächen festgelegt wird. Dabei können naturgemäß zur Erfüllung einer Funktion mehrere physikalische Effekte zum Einsatz kommen. Dies hängt von Einzelfall und der Zweckmäßigkeit ab.

Der erste Entwicklungsschritt besteht also in der Festlegung des physikalischen Effekts. Er bestimmt die verwendbaren Werkstoffe und die Geometrie. Es werden also Hilfsmittel und Methoden benötigt, um mögliche und möglichst zweckmäßige prinzipielle Lösungen (physikalischer Effekt, Effekträger, qualitative Gestalt des Wirkorts) zu finden. Zweckmäßig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass zum einen die Funktion im vorgegebenen Bauraum erfüllt werden kann, zum anderen auch die Rahmenbedingungen zur Realisierung der Lösung beachtet werden. Kritisch ist z. B. die Nutzung von Lösungsprinzipien, über die im Unternehmen keine Erfahrungen zur Realisierung vorhanden sind. Unkalkulierbare Risiken verhindern also mögliche innovative Lösungen.

Das methodische Vorgehen ist deshalb besonders vorteilhaft, weil ein Entwickler oder im späteren Prozess Konstrukteur nicht darauf angewiesen ist, im richtigen Augenblick einen Einfall für eine geeignete Lösung zu haben. Vielmehr werden diese systematisch mit Hilfe entsprechender Methoden erarbeitet. Das Vorgehen hierfür ist Gegenstand dieses Kapitels.

Eine optimale Lösung ist dabei durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Sie erfüllt alle Forderungen der Anforderungsliste sowie weitgehend auch alle Wünsche,
- sie kann unter den gegebenen Randbedingungen des Unternehmens realisiert werden, hierunter fallen z. B. vorgegebene Kosten (Target Costing), Liefertermine, Fertigungsmöglichkeiten usw.

Um eine solche Lösung zu erreichen, ist ein mehrstufiges Vorgehen erforderlich.

Naturgemäß geht es zuallererst darum, ein Feld möglicher Lösungen für die gestellte Aufgabe zu erzeugen. Basis hierfür ist die Funktionsstruktur, mit deren Hilfe die Gesamtaufgabe in überschaubare Teilaufgaben aufgeteilt wird. Zusätzlich gibt die Funktionsstruktur die funktionalen Zusammenhänge der Teilaufgaben untereinander wieder. Dazu wird der Zusammenhang zwischen dem Ein- und Ausgang jeder Teifunktion und damit für die Gesamtfunktion bezüglich des betrachteten Flusses (Stoff, Signal oder Energie) beschrieben.

Im zweiten Schritt werden dann jeder dieser lösungsneutralen Teifunktionen ein oder mehrere physikalische Effekte zugeordnet, mit deren Hilfe sie realisiert werden kann. Dies geschieht nach den vorliegenden spezifischen Problemen. Beispielsweise muss zur Erzeugung einer bestimmten Kraft auch ein physikalischer Effekt mit entsprechendem Potenzial ausgewählt werden.

Das bisher beschriebene Vorgehen entspricht dem klassischen Vorgehen eines Ingenieurs. Damit wird bereits ein Lösungsfeld aufgespannt, weil sowohl bei der Aufstellung der Funktionsstruktur als auch bei der Auswahl der physikalischen Effekte Varianten erzeugt werden können.

Eine Erweiterung des Lösungsfelds ist möglich, wenn zum einen durch die angewandte Suchmethode neue mögliche Lösungen gefunden werden und zum anderen dann das erzeugte Lösungsfeld durch einen Wechsel zu einer anderen Suchmethode erweitert wird.

Häufig kann eine Teilfunktion nur durch Kombination mehrerer physikalischer Effekte realisiert werden. Auch deshalb ist es sinnvoll, die Methoden zur Lösungsfindung entsprechend zu erweitern. Die nachfolgend vorgestellten entstammen u. a. aus dem Gebiet der Kreativitätstechnik mit den allgemeinen wiederkehrenden Methoden (vgl. Abschn. 5.1.3) oder beruhen auf Analogiebetrachtungen. Sie führen letztlich zu einer Lösungsoptimierung unter Beachtung der aktuellen Randbedingungen für die Entwicklung und Konstruktion im Unternehmen.

Die vorgestellten Methoden sind im Wesentlichen für die Entwicklung und Konstruktion neuer Produkte gedacht. Sie sind aber auch sehr hilfreich, wenn es darum geht, vorhandene Patente eines Wettbewerbers zu umgehen oder vorhandene Produkte, wenn auch nur in Teilbereichen, zu optimieren. In der industriellen Praxis müssen die vorgestellten Methoden der Problemsituation entsprechend ausgewählt, angepasst und angewendet werden.

## 1. Analogiebetrachtung

Wichtige Grundlage für Ingenieure (Entwicklung und Konstruktion) sind Informationen über den Stand der Technik. In einem ersten Schritt, vgl. auch Abschn. 5.1.1, werden typischerweise Erfahrungen aus der eigenen Arbeit genutzt. Insbesondere bei neuartigen Problemen reicht diese Betrachtungsweise aber nicht aus. Deshalb ist es sinnvoll und zielführend zu klären, bei welchen technischen oder auch nicht technischen Fragestellungen ähnliche Lösungen zu erwarten sind, welche für die aktuelle Fragestellung genutzt werden können.

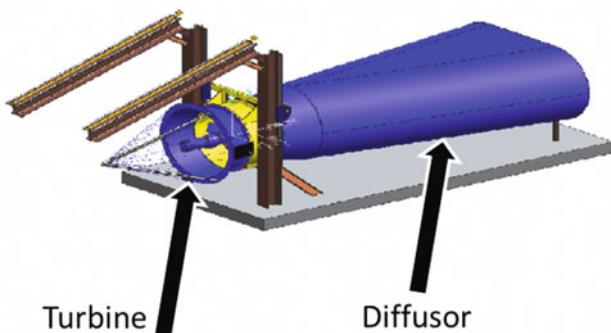
Am naheliegendsten ist zunächst, wenn vorhanden, immer eine Analyse der Konkurrenzprodukte. Unter Beachtung der rechtlichen Seite, insbesondere möglicher Patente, werden hierbei schon eine Reihe nutzbarer Lösungen entdeckt. Die Techniken des Internets erlauben eine sehr effiziente Recherche in den üblichen Quellen. Hierzu gehören z. B.

- Literaturrecherche,
- Auswertung von Verbandsberichten,
- Auswertung von Messen und Ausstellungen,
- Auswertung von Katalogen und Präsentationen der Konkurrenz,
- Patentrecherche usw.

Diese internetbasierten Prozeduren sind heute Stand der Technik an einem Ingenieurarbeitsplatz.

Zur Lösungssuche und zur Ermittlung von Systemeigenschaften ist die Übertragung eines vorliegenden Problems oder beabsichtigten Systems auf ein analoges nützlich. Hierbei wird das analoge System als Modell des beabsichtigten Systems zur weiteren Betrach-

**Abb. 6.29** Prototyp der Flussturbine (Sous 2011)



tung verwendet. Analogien werden bei technischen Systemen z. B. durch Änderung der Energieart gewonnen (Bengisu 1970; Schlösser und Olderaan 1961). Wichtig sind auch Analogiebetrachtungen zwischen technischen und nichttechnischen Systemen.

Neben der Anregung für die Lösungssuche bieten Analogien die Möglichkeit, durch Simulations- und Modelltechnik das Systemverhalten in einem frühen Entwicklungsstadium zu studieren, um daraus notwendige neue Teillösungen zu erkennen und/oder ggf. schon eine Optimierung einzuleiten.

Soll das analoge Modell auf Systeme mit bedeutend anderen Abmessungen und Zuständen übertragen werden, müssen Ähnlichkeitsbetrachtungen unterstützend vorgenommen werden.

In Teil 4 ist ein ausführliches Produktentwicklungsbeispiel dargelegt, in dem auch die Methode der Analogie verwendet wird.

**Bionik** Der Begriff „Bionik“ setzt sich aus den beiden Teilbegriffen „Biologie“ und „Technik“ zusammen. Die Bionik möchte Lösungen und Prinzipien der Biologie für technische Aufgabenstellungen nutzen (Nachtigall 2003). Insbesondere chemische Prozesse werden in der Natur häufig sehr effektiv und effizient ausgeführt. Aber auch für andere ingenieurmäßige Fragestellungen gibt es in der Natur Lösungen, die mit den Mitteln der industriellen Produktionstechnik genutzt werden können. Selbst wenn Lösungen nicht direkt übernommen werden können, so gibt das Studium der natürlichen Lösungen doch sehr viele Anregungen.

Im Folgenden soll ein Beispiel vorgestellt werden. Es stammt aus Sous (2011). Es geht dabei um die Fragestellung, wie der Auslaufdiffusor einer Flussturbine so gestaltet werden kann, dass er sowohl die Festigkeitsanforderungen während des Transports als auch die auftretenden statischen und dynamischen Kräfte beim Betrieb im Wasser erträgt kann. Eine Flussturbine dient der Stromerzeugung durch das strömende Wasser eines Flusses. Dazu wird eine Turbinen-Generatorkombination in den Fluss gebracht. Zur Wirkungsgraderhöhung befindet sich auf der Ausströmseite ein Diffusor, s. Abb. 6.29.

Das Problem besteht darin, dass durch die wirkenden Kräfte der Diffusor in Querrichtung zur Strömungsrichtung auf der breiten Seite zusammengedrückt wird. Hier musste

**Abb. 6.30** Skelett eines Schweinswals mit gekennzeichneter Hauptstruktur (Übersee Museum Bremen 2012)



eine kostengünstige und fertigungstechnisch einfach zu realisierende Lösung gefunden werden. Erste Analogiebetrachtungen zu Gewölbekonstruktion der Renaissance führten zu den Skelettaufbauten von Fischen. Das Skelett des Wals ist für große Drücke geeignet und von seiner Baugröße vergleichbar mit der Aufgabenstellung. In Abb. 6.30 ist das Skelett eines Schweinswals mit gekennzeichneter Hauptstruktur wiedergegeben.

Das Prinzip des Skeletts als tragende Struktur wurde auf den Diffusor übertragen. Die gesamte Konstruktion ist in einem Faserverbundwerkstoff ausgeführt. Die Fügestellen sind geklebt. Das Konstruktionsprinzip ist in Abb. 6.31 wiedergegeben.

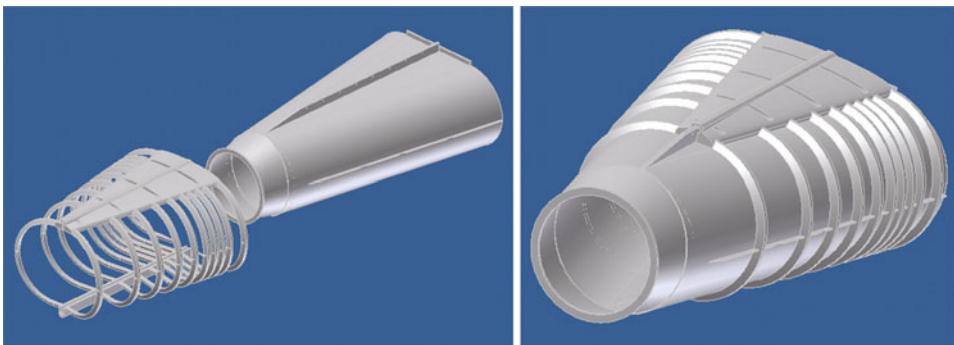
**Analyse bekannter technischer Systeme** Die Analyse bekannter technischer Systeme gehört zu den wichtigsten Hilfsmitteln, mit denen man schrittweise und nachvollziehbar zu neuen oder verbesserten Varianten bekannter Lösungen kommt.

Eine solche Analyse besteht in einem gedanklichen oder sogar stofflichen Zerlegen aus geführter Produkte. Sie kann als Strukturanalyse (vgl. Abschn. 5.1.3, Paragraf 1) aufgefasst werden, die nach Zusammenhängen in logischer, physikalischer und gestalterischer Hinsicht sucht. Aus der Baustruktur können die Teilstrukturen ermittelt werden. Von diesen ausgehend lassen sich bei weiterer Analyse auch die beteiligten physikalischen Effekte erkennen, die ihrerseits Anregung zu neuen Lösungsprinzipien für entsprechende Teilstrukturen der zu lösenden Aufgabenstellung geben können. Ebenso ist es möglich, aus der Analyse gefundene Lösungsprinzipien als solche zu übernehmen.

Bekannte Systeme zum Zwecke der Analyse können sein:

- Produkte oder Verfahren des Wettbewerbs,
- ältere Produkte und Verfahren des eigenen Unternehmens,
- ähnliche Produkte oder Baugruppen, bei denen einige Teilstrukturen bzw. Teile ihrer Funktionsstrukturen mit denen übereinstimmen, für die Lösungen gesucht werden sollen.

Da man sinnvollerweise nur solche Systeme analysiert, die zu der neuen Aufgabe einen gewissen Bezug haben oder sie sogar bereits zum Teil erfüllen, kann man bei dieser Art der



**Abb. 6.31** Konstruktionsprinzip der Tragkonstruktion für den Diffusor (Sous 2011)

Informationsgewinnung auch von einer systematischen Nutzung von Bewährtem bzw. von Erfahrung sprechen. Sie dürfte vor allem nützlich sein, wenn es gilt, zunächst einen ersten Lösungsansatz als Ausgangspunkt für weitere gezielte Variationen zu finden. Zu diesem Vorgehen ist kritisch zu bemerken, dass man Gefahr läuft, bei bekannten Lösungen zu bleiben und neue Wege nicht zu beschreiten.

**Messungen, Modellversuche** Messungen an ausgeführten Systemen, Modellversuche unter Ausnutzung der Ähnlichkeitsmechanik und sonstige experimentelle Untersuchungen gehören zu den wichtigsten Informationsquellen des Konstrukteurs. Besonders Rodenacker (1991) betrachtet das Experiment als wichtiges Hilfsmittel und zwar aus der Erkenntnis heraus, dass die Konstruktion als Umkehrung des physikalischen Experiments aufgefasst werden kann.

Bei feinwerktechnischen, mikromechanischen und elektronischen Produkten und Geräten der Massenfertigung sind experimentelle Untersuchungen wichtig und auch üblich, um Lösungen zu finden. Die Bedeutung experimenteller Zwischenschritte drückt sich auch in organisatorischer Hinsicht aus, da für solche Produktentwicklungen oft das Labor und die Mustererstellung in den Konstruktionsprozess einbezogen sind.

In ähnlicher Weise gehört auch das Testen und daraus folgende Ändern von Software-Lösungen zu dieser empirisch orientierten Methodengruppe, und es stellt ein notwendiges Vorgehen bei der Lösungsentwicklung dar.

## 2. Intuitiv betonte Methoden

Der Mensch ist ein kreatives Wesen. Diese Fähigkeit nicht zu nutzen, hieße mögliche Lösungen nicht zu entdecken. Insbesondere die Schnelligkeit, mit der Lösungen durch spontane Ideen gefunden werden, lässt die Anwendungen dieses Vorgehens als sinnvoll erscheinen. Bereits in Abschn. 5.1.1 wurde auf die Einbindung des opportunistischen Vorgehens in den Entwicklungsprozess hingewiesen. Es ist in der Praxis also sinnvoll, die Methode der Analogiebetrachtung, die im folgenden Kapitel dargestellten diskursiven Methoden und intuitive Methoden zur Lösungsfundung einzusetzen.

Der Einfall ist fast immer im Unter- bzw. Vorbewusstsein aufgrund der Fachkenntnis, der Erfahrung und angesichts der bekannten Aufgabenstellung schon weitgehend auf Eignung untersucht und aus verschiedenen Möglichkeiten ausgesondert worden, so dass oft dann nur ein Anstoß durch eine Ideenverbindung genügt, um ihn ins Bewusstsein treten zu lassen. Dieser Anstoß kann auch eine scheinbar nicht im Zusammenhang stehende äußere Erscheinung oder eine dem Thema fernliegende Diskussion sein. Häufig trifft der Konstrukteur mit seinem Einfall ins Schwarze, und auf dieser Basis sind dann nur noch Abwandlungen und Anpassungen nötig, die zur endgültigen Lösung führen. Wenn der Prozess so abläuft und ein erfolgreiches Produkt entsteht, war dies ein optimales Vorgehen und auch für den Konstrukteur selbst sehr befriedigend. Sehr viele gute Lösungen sind so geboren und erfolgreich weiterentwickelt worden. Eine Konstruktionsmethode soll und darf einen solchen Prozess nicht unterbinden. Sie kann ihn aber unterstützen.

Für ein Unternehmen ist es u. U. gefährlich, sich allein auf die Intuition seiner Konstrukteure zu verlassen. Die Konstrukteure selbst sollten sich hinsichtlich ihrer Kreativität auch nicht allein auf den Zufall oder den mehr oder weniger seltenen Einfall verlassen. Die rein intuitive Arbeitsweise hat folgende Nachteile:

- Der richtige Einfall kommt nicht zur rechten Zeit, denn er kann nicht erzwungen werden,
- wegen bestehender Konventionen und eigener fixierter Vorstellungen werden neue Wege nicht erkannt und
- aufgrund mangelnder Informationen dringen neue Technologien oder Verfahren nicht in das Bewusstsein der Konstrukteure.

Diese Gefahren werden umso größer, je mehr die Spezialisierung fortschreitet, die Tätigkeit der Mitarbeiter einer stärkeren Aufgabenteilung unterliegt und der Zeitdruck zunimmt.

Mehrere Methoden haben zum Ziel, die Intuition zu fördern und durch Gedankenassoziationen neue Lösungswege anzuregen. Die einfachste und vielfach geübte Methode sind Gespräche und kritische Diskussionen mit Kollegen, aus denen Anregungen, Verbesserungen und neue Lösungen entstehen. Führt man eine solche Diskussion sehr straff und beachtet man dabei die allgemein anwendbaren Methoden des gezielten Fragens, der Negation und Neukonzeption, des Vorwärtsschreitens usw. (vgl. Abschn. 5.1.3), so kann sie sehr wirksam und fördernd sein.

Intuitiv betonte Methoden wie Brainstorming, Synektik, Galeriemethode und Methode 635 nutzen gruppendifnamische Effekte, wie Anregungen durch unbefangene Äußerungen von Partnern mit Hilfe von Assoziationen.

Diese Vorgehensweisen waren zum größten Teil für nichttechnische Probleme vorgeschlagen worden. Sie sind auf jedem Gebiet anwendbar, um neue unkonventionelle Ideen zu erzeugen, und daher auch im konstruktiven Bereich einsetzbar.

**Brainstorming** Brainstorming lässt sich am besten mit Gedankenblitz, Gedankensturm oder Ideenfluss bezeichnen, wobei gemeint ist, dass Denken sich zu einem Sturm, zu einer Flut von neuen Gedanken und Ideen freimachen soll. Die Vorschläge für dieses Vorgehen

stammen von Osborn (1957). Sie beabsichtigen, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass eine Gruppe von aufgeschlossenen Menschen, die aus möglichst vielen unterschiedlichen Erfahrungsbereichen stammen sollten, vorurteilslos Ideen produziert und sich von den geäußerten Gedanken wiederum zu weiteren neuen Vorschlägen anregen lässt (Wiething 1958). Dieses Vorgehen macht vom unbefangenen Einfall Gebrauch und spekuliert weitgehend auf Assoziation, d. h. auf Erinnerung und auf Verknüpfung von Gedanken, die bisher noch nicht im vorliegenden besonderen Zusammenhang gesehen wurden oder einfach noch nicht bewusst geworden sind. Ein zweckmäßiges Vorgehen ist:

### Zusammensetzung der Gruppe

- Eine Gruppe mit einem Leiter wird gebildet. Sie sollte mindestens fünf, jedoch höchstens 15 Personen umfassen. Weniger als fünf Personen haben ein zu geringes Anschauungs- und Erfahrungsspektrum und geben damit zu wenig Anregungen. Bei mehr als 15 Personen ist eine intensive Mitwirkung fraglich, weil Passivität und Absonderung von Teilnehmern auftreten können.
- Die Gruppe muss nicht allein aus Fachleuten zusammengesetzt sein. Wichtig ist, dass möglichst viele unterschiedliche Fach- und Tätigkeitsbereiche vertreten sind, wobei durch Hinzuziehen von Nichttechnikern eine ausgezeichnete Bereicherung erzielt werden kann.
- Die Gruppe sollte nicht hierarchisch, sondern möglichst aus Gleichgestellten zusammengesetzt sein, damit Hemmungen in der Gedankenäußerung, die möglicherweise durch Rücksicht auf Vorgesetzte oder auf unterstellte Mitarbeiter entstehen können, entfallen.

### Leitung der Gruppe

- Der Leiter der Gruppe sollte nur im organisatorischen Teil (Einladung, Zusammensetzung, Dauer und Auswertung) initiativ wirken. Vor Beginn des eigentlichen Brainstormings muss er das Problem schildern und bei der Sitzung für das Einhalten der Spielregeln, vor allen Dingen für eine aufgelockerte Atmosphäre sorgen. Dies kann er erzielen, indem er selbst am Anfang einige absurd erscheinende Ideen vorbringt. Auch ein Beispiel aus anderen Brainstorming-Sitzungen kann geeignet sein. Er darf keine Lenkungsrolle in der Ideenfindung übernehmen. Dagegen kann er Anstoß zu neuen Ideen geben, wenn die Produktivität der Gruppe nachlässt. Der Gruppenleiter verhindert Kritik am Vorgebrachten. Er bestimmt ein oder zwei Protokollführer.

### Durchführung

- Alle Beteiligten müssen in der Gedankenäußerung ihre Hemmungen überwinden, d. h., nichts sollte bei einem selbst oder in der Gruppe als absurd, als falsch, als blamabel, als dumm oder als schon bekannt angesehen werden.

- Niemand darf am Vorgebrachten Kritik üben, und jeder muss sich sog. „Killerphrasen“ enthalten, wie „Ist alles schon dagewesen!“, „Haben wir noch nie gemacht!“, „Geht niemals!“, „Gehört doch nicht hierher!“ usw.
- Die vorgebrachten Ideen werden von den anderen Teilnehmern aufgegriffen, abgewandelt und weiterentwickelt. Ferner können und sollen mehrere Ideen kombiniert und als neuer Vorschlag vorgebracht werden.
- Alle Ideen oder Gedanken werden aufgeschrieben, skizziert oder auf ein Tonband aufgenommen.
- Die Vorschläge sollten soweit konkretisiert sein, dass eine Lösungsidee bezogen auf das vorliegende Problem erkennbar wird.
- Zunächst wird die Realisationsmöglichkeit der Vorschläge nicht beachtet.
- Die Sitzung soll im Allgemeinen nicht viel länger als eine halbe bis dreiviertel Stunde dauern. Längere Zeiten bringen erfahrungsgemäß nichts Neues und führen zu unnötigen Wiederholungen. Es ist besser, später mit einem neuen Informationsstand oder anderer personeller Zusammensetzung einen neuen Anlauf zu versuchen.

### Auswertung

- Die Ergebnisse werden von den zuständigen Fachleuten gesichtet, auf lösungsträchtige Merkmale hin analysiert, wenn möglich in eine systematische Ordnung gebracht und auf Brauchbarkeit hinsichtlich einer möglichen Realisierung untersucht. Auch sollen aus den Vorschlägen neue mögliche Ideen entwickelt werden.
- Das gewonnene Ergebnis sollte mit der Gruppe nochmals diskutiert werden, damit etwaige Missverständnisse oder einseitige Auslegungen vermieden werden. Auch könnten bei dieser Gelegenheit nochmals neue, weiterführende Gedanken entwickelt werden.

Vorteilhafterweise macht man vom Brainstorming Gebrauch (Pahl und Beelich 1981), wenn

- noch kein realisierbares Lösungsprinzip vorliegt,
- das physikalische Geschehen einer möglichen Lösung noch nicht erkennbar ist,
- das Gefühl vorherrscht, mit bekannten Vorschlägen nicht weiterzukommen oder
- eine völlige Trennung vom Konventionellen angestrebt wird.

Dieses Vorgehen ist auch dann zweckmäßig, wenn es sich um die Bewältigung von Teilproblemen innerhalb bekannter oder bestehender Systeme handelt. Das Brainstorming hat außerdem einen nützlichen Nebeneffekt. Alle Beteiligten erhalten indirekt neue Informationen, wenigstens aber Anregungen über mögliche Verfahren, Anwendungen, Werkstoffe, Kombinationen usw., weil der vielseitig zusammengesetzte Kreis über ein sehr breites Spektrum verfügt (z. B. Konstrukteur, Montageingenieur, Fertigungsingenieur, Werkstoff-Fachmann, Einkäufer usw.). Man ist überrascht, wie groß die Vielfalt und Breite von Ideen ist, die ein solcher Kreis produzieren kann. Der Konstrukteur wird sich aber auch bei ande-

rer Gelegenheit an die in einer Sitzung geäußerten Ideen erinnern. Sie gibt neue Impulse, weckt Interesse an Entwicklungen und stellt eine Abwechslung in der Routine dar.

Kritisch ist zu bemerken, dass man von einer Brainstorming-Sitzung keine großen Überraschungen oder Wunder erwarten darf. Die meisten Vorschläge sind technisch oder wirtschaftlich nicht realisierbar oder den Fachleuten bekannt. Das Brainstorming soll in erster Linie Anstoß zu neuen Ideen geben, kann aber keine fertigen Lösungen produzieren, weil die Probleme meistens zu komplex und zu schwierig sind, als dass sie durch spontane Ideen allein lösbar wären. Wenn aber aus den Äußerungen ein bis zwei brauchbare neue Gedanken entspringen, die es wert sind, weiterverfolgt zu werden, oder wenn es gelingt, eine Vorklärung möglicher Lösungsrichtungen zu entwickeln, ist viel gewonnen.

**Methode 635** Von Rohrbach (1969) wurde das Brainstorming zur Methode 635 weiterentwickelt: Nach Bekanntgabe der Aufgabe und ihrer sorgfältigen Analyse werden die Teilnehmer aufgefordert, jeweils drei Lösungsansätze zu Papier zu bringen und stichwortartig zu erläutern. Nach einiger Zeit gibt man diese Unterlagen an seinen Nachbarn weiter, der wiederum nach Durchlesen der vom Vorgänger gemachten Vorschläge drei weitere Lösungen, ggf. in einer Weiterentwicklung, hinzufügt. Bei sechs Teilnehmern wird dies solange fortgesetzt, bis alle drei Lösungsansätze von den jeweils fünf anderen Teilnehmern ergänzt oder assoziativ weiterentwickelt wurden. Daher auch die Bezeichnung Methode 635.

Gegenüber dem zuvor beschriebenen Brainstorming ergeben sich folgende Vorteile:

- Eine tragende Idee wird systematischer ergänzt und weiterentwickelt,
- es ist möglich, den Entwicklungsvorgang zu verfolgen und den Urheber des zum Erfolg führenden Lösungsprinzips annähernd zu ermitteln, was aus rechtlichen Gründen von Bedeutung sein kann und
- die Problematik der Gruppenleitung entfällt weitgehend.

Als nachteilig kann sich eine geringere Kreativität des Einzelnen durch Isolierung und mangelnde Stimulierung einstellen, weil die Aktivität der Gruppe nicht unmittelbaren Ausdruck findet.

**Galeriemethode** Die Galeriemethode nach Hellfritz (1978) verbindet Einzelarbeit mit Gruppenarbeit und eignet sich besonders bei Gestaltungsproblemen, weil bei ihr die Lösungsvorschläge in Form von Skizzen sehr gut präsentiert werden können. Voraussetzungen und Gruppenbildung entsprechen den Regeln des Brainstormings. Die Methode wird nach folgenden Einzelphasen angewandt:

*Einführungsphase*, bei der das Problem durch den Gruppenleiter dargestellt und durch Erläuterungen erklärt wird.

*Ideenbildungsphase I*. Es erfolgt zunächst durch jedes Gruppenmitglied für sich eine intuitive und vorurteilslose Lösungssuche mit Hilfe von Skizzen und ggf. zweckmäßigen verbalen Erläuterungen für eine Dauer von etwa 15 Minuten.

*Assoziationsphase.* Die bisherigen Ergebnisse der Ideenbildungsphase I werden zunächst in einer Art Galerie aufgehängt, damit alle Gruppenmitglieder diese visuell erfassen und diskutieren können. Das Ziel dieser etwa 15-minütigen Assoziationsphase ist es, durch Negation und Neukonzeption neue Ideen zu gewinnen und ergänzende oder verbessernde Vorschläge zu erkennen.

*Ideenbildungsphase II.* Die aus der Assoziationsphase gewonnenen Einfälle oder Erkenntnisse werden nun von den einzelnen Gruppenmitgliedern festgehalten und/oder weiterentwickelt.

*Selektionsphase.* Alle entstandenen Ideen werden gesichtet, geordnet und auch ggf. noch vervollständigt. Erfolgsversprechende Lösungsansätze werden sodann ausgewählt. Auch können lösungsträchtige Merkmale für ein späteres diskursives Vorgehen (vgl. Abschn. 6.3.3) durch Analyse gewonnen werden.

Die Galeriemethode zeichnet sich vor allem durch folgende Vorteile aus:

- intuitives Arbeiten in der Gruppe ohne ausufernde Diskussionen,
- wirksame Vermittlung mit Hilfe von Skizzen besonders bei Gestaltungsfragen,
- individuelle Leistung bleibt erkennbar und
- gut auswertbare, dokumentierbare Unterlagen.

**Delphi-Methode** Bei dieser Methode werden Fachleute, von denen man eine besondere Kenntnis der Zusammenhänge erwartet, schriftlich befragt und um eine entsprechende schriftliche Äußerung gebeten (Dalkey und Helmer 1963). Die Befragung läuft nach folgendem Schema ab:

### 1. Runde:

Welche Lösungsansätze zur Bewältigung des angegebenen Problems sehen Sie? Geben Sie spontan Lösungsansätze an!

### 2. Runde:

Sie erhalten eine Liste von verschiedenen Lösungsansätzen zu dem angegebenen Problem! Bitte gehen Sie diese Liste durch und nennen Sie dann weitere Vorschläge, die Ihnen neu einfallen oder durch die Liste angeregt wurden.

### 3. Runde:

Sie erhalten die Endauswertung der beiden Ideenerfragungsrunden. Bitte gehen Sie diese Liste durch und schreiben Sie die Vorschläge nieder, die Sie im Hinblick auf eine Realisierung für die besten halten.

Dieses aufwändige Vorgehen muss sorgfältig geplant werden und wird im Allgemeinen auf generelle Fragen, die mehr grundsätzliche und unternehmenspolitische Aspekte haben, beschränkt bleiben. Im technisch-konstruktiven Bereich kann die Delphi-Methode

eigentlich nur bei sehr langfristigen Entwicklungen in der Grundsatzdiskussion Bedeutung erlangen.

**Synektik** Der Name Synektik ist ein aus dem Griechischen abgeleitetes Kunstwort und bedeutet Zusammenfügen verschiedener und scheinbar voneinander unabhängiger Begriffe. Synektik ist ein dem Brainstorming verwandtes Verfahren mit dem Unterschied, dass die Absicht besteht, sich durch Analogien aus dem nichttechnischen oder dem halbtechnischen Bereich anregen und leiten zu lassen.

Vorgeschlagen wurde diese Methode von Gordon (1961). Sie ist im Vorgehen systematischer als das willkürliche Sammeln von Ideen beim Brainstorming. Hinsichtlich der Unbefangenheit sowie Vermeidung von Hemmungen und Kritik gilt dasselbe wie bereits beim Brainstorming dargelegt.

Der Leiter der Gruppe hat hier eine zusätzliche Aufgabe. Er versucht anhand der geäußerten Analogien den Gedankenfluss entsprechend dem nachstehenden Schema weiterzuführen. Die Gruppe sollte nur bis zu sieben Teilnehmer umfassen, damit ein Zerfließen der Gedankengänge vermieden wird.

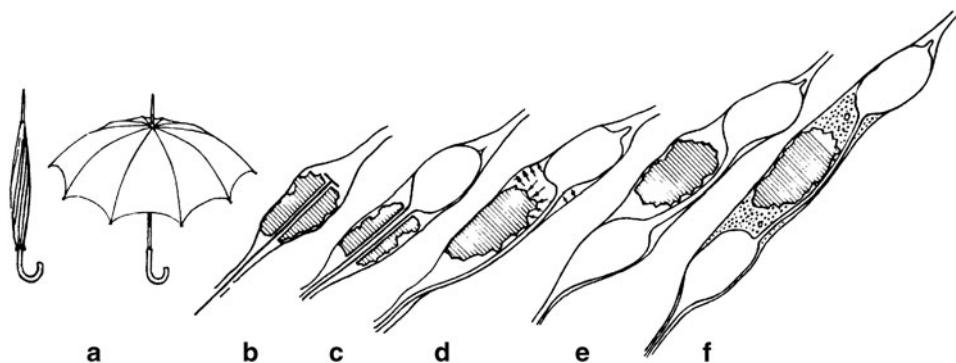
Man hält sich dabei an folgende Schritte:

- Darlegen des Problems,
- Vertraut machen mit dem Problem (Analyse),
- Verstehen des Problems, es ist damit jedem vertraut,
- Verfremden des Vertrauten, d. h. Analogien und Vergleiche aus anderen Lebensbereichen anstellen,
- Analysieren der geäußerten Analogie,
- Vergleichen zwischen Analogie und bestehendem Problem,
- Entwickeln einer neuen Idee aus diesem Vergleich,
- Entwickeln einer möglichen Lösung.

Unter Umständen beginnt man wieder mit einer anderen Analogie, wenn das Ergebnis unbefriedigend ist.

Ein Beispiel soll das Finden von Lösungen mit Hilfe von Analogien und die schrittweise Weiterentwicklung zu einem Vorschlag zeigen. In einem Seminar zur Suche nach Möglichkeiten zur Entfernung von Harnleitersteinen aus dem menschlichen Körper wurden mechanische Vorrichtungen diskutiert, mit denen der Harnleiterstein umfasst, dann festgespannt und herausgezogen werden sollte. Die Vorrichtung hätte dazu im Harnleiter aufgespannt und geöffnet werden müssen. Das Stichwort „Spannen“ bzw. „Aufspannen“ regte einen der Teilnehmer an, nach Analogien zu suchen, was gespannt werden kann, s. Abb. 6.32.

Assoziation. Regenschirm a. Frage: Wie kann man das Regenschirmprinzip nutzen? – Stein durchbohren, Schirm durchstecken, aufspannen b. Technisch schlecht realisierbar – Schlauch durchstecken und aufblasen am dünneren Ende c. Loch bohren irreal – Schlauch



**Abb. 6.32 a-f** Schrittweise Entwicklung eines Lösungsprinzips zur Entfernung von Harnleitersteinen durch Bilden einer Analogie und schrittweiser Verbesserung (nach Handskizzen), Bezeichnungen vgl. Text

vorbeischieben d. Stein beim Rückzug vorn, ergibt Widerstand und möglicherweise Zerstören des Harnleiters – zweiten Ballon vorschalten als Wegbereiter e. Stein zwischen beiden Ballons in ein Gel einbetten und herausziehen f.

Dieses Beispiel zeigt die Assoziation zu einer halbtechnischen Analogie (Regenschirm), von der aus die Lösung angesichts der bestehenden speziellen Bedingungen weiterentwickelt wurde. (Die gezeigte Lösung ist nicht die vorgeschlagene Endlösung des zitierten Seminars, sondern nur ein Beispiel für beobachtetes Vorgehen).

Kennzeichnend ist die unbefangene Vorgehensweise unter Benutzung einer Analogie, die bei technischen Problemen zweckmäßigerweise aus dem nichttechnischen oder halbtechnischen Bereich und bei nichttechnischen Problemen umgekehrt aus dem technischen Bereich gewählt wird. Die Analogiebildung wird im ersten Anlauf meist spontan geschehen, bei Weiterverfolgung und Analyse von bestehenden Vorschlägen ergeben sich diese dann meist stärker schrittweise und systematisch abgeleitet.

**Kombinierte Anwendung** Ein strenges Vorgehen nur nach der einen oder anderen Methode stellt sich oft nicht ein. Erfahrungen zeigen, dass

- beim Brainstorming der Gruppenleiter oder eine andere Person bei Nachlassen der Produktivität der Ideen durch ein teilweise synektisches Vorgehen – Ableitung von Analogien, systematisches Suchen nach dem Gegenteil oder nach der Vervollständigung – eine neue Ideenflut entfachen kann,
- eine neue Idee oder eine Analogie die Denkrichtung und Vorstellung der Gruppe stark ändert,
- eine Zusammenfassung des bisher Erkannten auch wiederum zu neuen Ideen führt,
- die bewusste Anwendung der Methode der Negation und Neukonzeption und des Vorwärtsschreitens (vgl. Abschn. 5.1.3) die Ideenvielfalt anzureichern und weiterzuführen vermag.

In dem zitierten Seminar ergab der geäußerte Gedanke „Stein zerstören“ neue Vorschläge wie Bohren, Zerschlagen, Hämmern, Ultraschallanwendung. Bei Nachlassen der Ideenproduktivität stellte dann der Gruppenleiter die Frage: „Wie zerstört die Natur?“, was sofort neue Vorschläge hervorrief. Verwittern, Hitze- und Kälteeinfluss, Vermodern, Verfaulen, Bakterien, Sprengen mit Hilfe von Eis, chemisch auflösen. Eine Zusammenfassung der zwei Prinzipien: „Stein umfassen“ und „Stein zerstören“ provozierte die Frage: „Was könnte noch fehlen?“ Hierauf folgte der Vorschlag: „Stein nicht umfassen, sondern nur berühren“, was wiederum zu neuen Ideen führte: Ansaugen, Ankleben, Kraftangriffspunkt erzeugen.

Die angeführten Methoden sind ggf. in Kombination so anzuwenden, wie sie sich nach den jeweiligen Umständen zwanglos anbieten und sich am besten nutzen lassen. Pragmatische Handhabung sichert den größten Erfolg.

### 3. Theorie des erforderlichen Problemlösens TRIZ

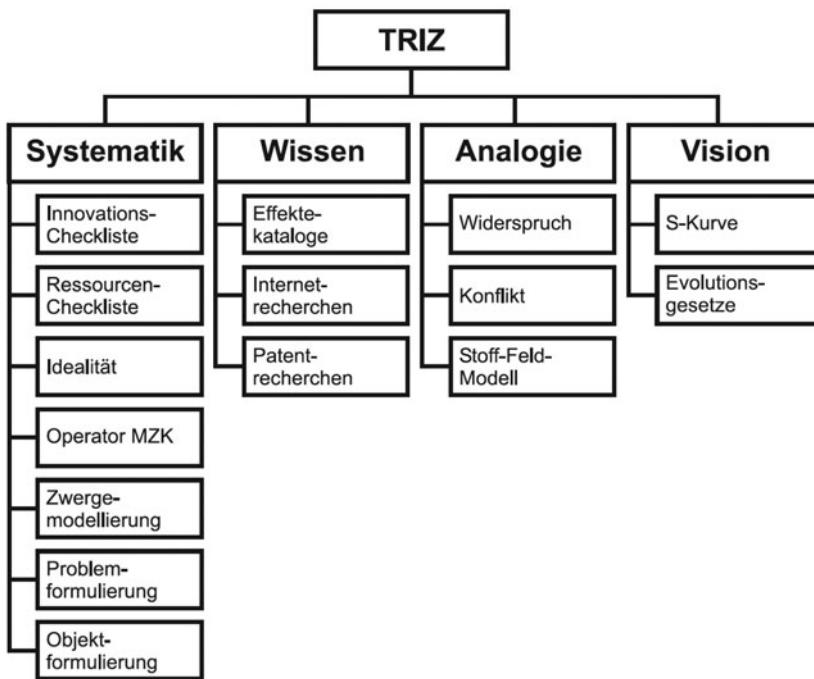
Die Theorie des erforderlichen Problemlösens (*TRIZ*, von russisch: Teoriya Rezhenija Jzbretatelskich Zadach) wurde seit 1945 von Genrich Altschuller entwickelt und befasst sich mit der methodischen Entwicklung innovativer Ideen und Produkte (Klein 2002). Der Schwerpunkt der TRIZ liegt in der frühen Produktentwicklungsphase, in der nach einem neuen, innovativen Produkt gesucht wird. Hierbei wird sie für die Entwicklung allgemeiner technischer Systeme angewendet, insbesondere für die Entwicklung von Produkten und verfahrenstechnischen Prozessen.

Hauptmerkmal der Problemlösung mit der TRIZ ist das Formulieren, Verstärken und Überwinden technischer und physikalischer Widersprüche in technischen Systemen. Im Gegensatz zu den gebräuchlichen Varianten des „Versuch-und-Irrtum“-Lösungsverfahrens, wie z. B. Brainstorming, berücksichtigt die TRIZ empirisch ermittelte Entwicklungsgesetze technischer Systeme und ermöglicht daher eine gezielte Suche nach Problemlösungen. Grundlage für diese Entwicklungsgesetze bildete die Analyse von Patenten.

Altschuller bearbeitete während seines Militärdienstes Patente und half bei der Anfertigung der Patentschriften. Da er der Überzeugung war, dass sich der Erfindungsprozess strukturieren und systematisieren ließe, begann Altschuller mit der Untersuchung von ca. 200.000 Patenten. Dabei kam er zu den folgenden Erkenntnissen, auf deren Grundlage Altschuller die Methoden und Werkzeuge der TRIZ entwickelte:

- Abstrahierte Problemstellungen und deren Lösungen wiederholen sich in verschiedenen Wissenschaftszweigen und industriellen Anwendungsfällen,
- die Evolution technischer Systeme verläuft immer nach ähnlichen Mustern und
- jeder Erfindung liegt ein technischer oder physikalischer Widerspruch zugrunde, der überwunden wurde.

**Einordnung der TRIZ in die Allgemeine Konstruktionsmethodik** Die Theorie des erforderlichen Problemlösens TRIZ legt ihren Schwerpunkt auf die frühen Phasen der Produktentwicklung, dem Planen und Klären der Aufgabe sowie dem Konzipieren. Hierfür stellt sie Methoden und Werkzeuge bereit, die es ermöglichen, aus konventionellen



**Abb. 6.33** Die vier Säulen der TRIZ (Herb et al. 2000)

Denkbahnen auszubrechen, um damit unkonventionelle, innovative Lösungen für Probleme zu generieren. Die TRIZ findet sich somit in dem Rahmenkonzept der Allgemeinen Konstruktionsmethodik wieder und ergänzt diese besonders um die Aspekte der *widerspruchsorientierten Problemlösung* und die Nutzung von Wissensspeichern, die aus umfangreichen Patentanalysen gewonnen wurden.

**Methoden und Werkzeuge der TRIZ** Die Methoden und Werkzeuge der TRIZ werden in die Kategorien Systematik, Wissen, Analogie und Vision unterteilt (Herb et al. 2000). Abbildung 6.33 zeigt diese vier grundlegenden Bereiche und die ihnen zugeordneten Methoden.

Der Bereich der Systematik enthält Methoden zur vollständigen Beschreibung der Aufgabenstellung und Werkzeuge zur Analyse und Synthese von Problemen und deren Lösungen. Der Wissensbereich betrachtet Effektkataloge und die Möglichkeiten der Internet- und Patentrecherche. Im Bereich der Analogie sind sowohl der Konflikt als auch der Widerspruch zwischen zwei physikalischen Parametern beheimatet. Die Überwindung dieser Probleme mit Hilfe der sog. Widerspruchsmatrix führen zu einer innovativen Lösung. Der Bereich der Vision betrachtet die Entwicklung einer Technologie und gibt anhand von Evolutionsgesetzen für technische Systeme Hinweise, wie diese weiterentwickeln wird.

- 1 Informationen über das zu verbessernde System und dessen Umfeld
  - 1.1 Systembezeichnung
  - 1.2 Primäre Nützliche Funktion des Systems (Zweck bzw. Hauptfunktion)
- 2 Derzeitige Systemstruktur
- 3 Arbeitsweise des Systems
- 4 System-Umfeld
  - 4.1 Gleichberechtigte Systeme:
    - 4.1.1 interagieren mit dem System (positiv, negativ)
    - 4.1.2 könnten möglicherweise interagieren
  - 4.2 Obersystem und natürliche Umgebung
- 5 Verfügbare Ressourcen
- 6 Detailinformationen zum Problem
  - 6.1 Angestrebte Verbesserung
  - 6.2 Wünschenswerte Systemstruktur  
oder
  - 6.3 Zu eliminierender Nachteil (Primär Schädliche Funktion)
  - 6.4 Wirkweise des Nachteils
  - 6.5 Entwicklungsgeschichte von Problem und Lösungsversuchen
  - 6.6 Alternativ zu lösende Probleme
- 7 Grenzen der Systemänderung
- 8 Analoge Lösungsansätze
- 9 Auswahlkriterien für Lösungskonzepte

**Abb. 6.34** Innovationscheckliste (nach Herb et al. 2000)

Um die Anwendung der TRIZ zu erleichtern und zu strukturieren, wurde der sog. Algorithmus des erforderlichen Problemlösens (*ARIZ*) geschaffen. Dieser Algorithmus ordnet die Methoden und Werkzeuge der TRIZ und bietet somit eine Handlungsanweisung zur erforderlichen Problemlösung. Aufgrund der Vielzahl an technischen Problemen haben sich zahlreiche unterschiedliche Versionen des ARIZ herausgebildet, auf deren Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden soll. Für eine genauere Betrachtung des ARIZ sei die einschlägige Literatur empfohlen (Altschuller 1998; Herb et al. 2000; Klein 2002; Orloff 2002).

*Systematik* Die *Innovationscheckliste* dient der systematischen Analyse eines Problems. Sie soll es ermöglichen, alle wesentlichen Informationen über eine Aufgabe zu sammeln und durch gezielte Fragestellungen ein klares Verständnis für die Aufgabe zu gewinnen. Hierbei wird eine präzise Beschreibung des betreffenden Systems, dessen Umfeld, der angestrebten Ziele und der hinter dem Problem steckenden Historie angestrebt. Die Fragestellungen der Innovationscheckliste sind in Abb. 6.34 aufgeführt.

Die *Ressourcencheckliste* dient dazu, alle für die Lösungsfindung zur Verfügung stehenden Ressourcen aufzudecken. Ressourcen können Stoffe, Felder, Zeit u. a. sein. Ziel ist es, diese Ressourcen zur Lösungsfindung zu nutzen und nicht neue Objekte in den Entwicklungsprozess einzubringen. Hiermit wird auch die Verwirklichung der Idealität des Produkts angestrebt.

Die *Idealität* soll den Blick auf die ideale, perfekte Lösung des Problems lenken. Nach Altschuller ist die ideale *Maschine* eine solche, die ohne zu existieren ihre Funktion erfüllt (Altschuller 1998). Als praktische Umsetzung der Idealität wird versucht, „schädliche“ und Hilfsfunktionen zugunsten der Hauptfunktion zu beseitigen.

Als psychologische Hilfstechniken zur Überwindung von *Denkbarrieren* stellt die TRIZ Methoden bereit, wie den *Operator MZK* (Maß-Zeit-Kosten, auch GZK: Größe-Zeit-Kosten) oder das Modellieren mit „kleinen Männchen“, auch *Zwergemodellierung* genannt. Beim Operator MZK werden die Parameter der Maße, der Zeit und der Kosten bei einem absoluten Minimum und einem absoluten Maximum betrachtet. Ziel ist es, herauszufinden, wie sich das technische System unter diesen Extremen verhält und welche Schlüsse daraus für die Lösungsfindung gezogen werden können. Bei der Zwergemodellierung wird das technische System aufgelöst und durch eine Vielzahl „kleiner Männchen“ ersetzt, die die Aufgabe zu erfüllen haben. Auch hier geht es darum, neue Lösungsansätze zu generieren.

Die *Problemformulierung* entspricht einer Funktionsstruktur, wobei diese nicht flussorientiert ist, wie in der Konstruktionsmethodik. Aufbauend auf der Innovationscheckliste dient sie der weiteren Analyse und Präzisierung des Problems. Die Problemformulierung wird mit der *Primär Nützlichen Funktion (PNF)*, vgl. Zweck bzw. Hauptfunktion, und der *Primär Schädlichen Funktion (PSF)* begonnen. Die PNF drückt den Zweck des technischen Systems aus, dem die PSF entgegensteht. Durch die sukzessive Erweiterung zu einem Ursache-Wirkung-Diagramm wird versucht zu klären, wie die PSF auf die PNF einwirkt. Daraus können dann Ansätze zur Lösung des Problems abgeleitet werden, z. B. mit Hilfe der Widerspruchsmatrix.

Die *Objektformulierung* betrachtet die bestehenden Teile eines technischen Systems und dient der Visualisierung aller Wirkungen eines Teils auf die anderen. Gehen von einem Teil besonders viele negative Wirkungen aus, kann geprüft werden, ob dieses Teil nicht modifiziert oder entfernt werden kann. Diese Vorgehensweise, auch „Trimming“ genannt, soll ein bestehendes System hinsichtlich seiner Funktionen und Kosten optimieren.

**Wissen** Neben den methodischen Werkzeugen des Bereichs Systematik beinhaltet die TRIZ *Effektkataloge* für physikalische, chemische und geometrische Effekte. Aufgrund des Umfangs der Datenbanken sind diese meist in kommerzieller Software zur Anwendung der TRIZ enthalten. Innerhalb der TRIZ werden insbesondere die *Internet- und Patentrecherche* als Informationsquellen herausgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass für die meisten Probleme bereits Lösungen erarbeitet wurden. Statt mit hohem Ressourcenaufwand eigene Lösungen zu entwickeln, können diese Lösungen genutzt werden. In der Patentliteratur finden sich Herb zufolge über 90 % an ungeschützten Patenten, weil sie nicht rechteständig sind, zurückgezogen wurden oder deren Schutz abgelaufen ist (Herb et al. 2000).

**Analogie** Den Kern der TRIZ stellen die 40 *Innovativen Grundprinzipien (IGP)* zum Überwinden technischer Widersprüche dar. Altschuller fand bei seinen Patentrecherchen 39 Parameter, die ein technisches System und somit dessen Widersprüche beschreiben können

1. Masse/Gewicht eines beweglichen Objektes	21. Leistung, Kapazität
2. Masse/Gewicht eines unbeweglichen Objektes	22. Energieverluste
3. Länge eines beweglichen Objektes	23. Materialverluste
4. Länge eines unbeweglichen Objektes	24. Informationsverlust
5. Fläche eines beweglichen Objektes	25. Zeitverlust
6. Fläche eines unbeweglichen Objektes	26. Materialmenge
7. Volumen eines beweglichen Objektes	27. Zuverlässigkeit (Sicherheit)
8. Volumen eines unbeweglichen Objektes	28. Messgenauigkeit
9. Geschwindigkeit	29. Fertigungsgenauigkeit
10. Kraft	30. Äußere negative Einflüsse auf das Objekt
11. Spannung oder Druck	31. Negative Nebeneffekte des Objektes
12. Form	32. Fertigungsfreundlichkeit
13. Stabilität der Zusammensetzung des Objektes	33. Bedienkomfort
14. Festigkeit	34. Reparaturfreundlichkeit
15. Haltbarkeit eines beweglichen Objektes	35. Anpassungsfähigkeit
16. Haltbarkeit eines unbeweglichen Objektes	36. Kompliziertheit der Struktur
17. Temperatur	37. Komplexität in der Kontrolle der Steuerung
18. Helligkeit	38. Automatisierungsgrad
19. Energieverbrauch eines beweglichen Objektes	39. Produktivität (Funktionalität)
20. Energieverbrauch eines unbeweglichen Objektes	

**Abb. 6.35** Technische Parameter (nach Altschuller 1998)

(s. Abb. 6.35). Ein technischer Widerspruch wird durch einen zu verbessernden Parameter beschrieben und einen Parameter, der sich gleichzeitig verschlechtert.

Zur Überwindung von technischen Widersprüchen können die 40 Innovativen Grundprinzipien verwendet werden (s. Abb. 6.36). Aufgrund seiner empirischen Untersuchungen konnte Altschuller eine Matrix aufstellen, die den technischen Parametern, die im Widerspruch zueinander stehen, bis zu vier Grundprinzipien zuordnet, mit denen dieser Widerspruch in der Vergangenheit bereits erfolgreich gelöst wurde (s. Abb. 6.37). Die vollständige *Widerspruchsmatrix* ist der Literatur zu entnehmen (Altschuller 1998; Herb et al. 2000; Klein 2002; Orloff 2002). Darüber hinaus sind im Internet Datenbanken vorhanden, über die eine schnelle und komfortable Suche nach den entsprechenden Innovationsprinzipien möglich ist, z. B. unter [www.triz-online.de](http://www.triz-online.de).

Neben den technischen Widersprüchen gibt es solche, die so grundsätzlich sind, dass sie mit der Widerspruchsmatrix nicht gelöst werden können. Diese Widersprüche werden auch als Konflikt oder physikalische Widersprüche bezeichnet. Hierbei geht es z. B. um Situationen, in denen ein Körper gleichzeitig heiß und kalt sein soll, um seine Funktion zu erfüllen. Um einen Konflikt zu lösen gibt es die vier *Separationsprinzipien*:

- *Separation im Raum*: Die zu verwirklichenden Anforderungen oder Funktionen werden auf verschiedene Orte oder Teile des technischen Systems verteilt, so dass sie nicht am gleichen Ort, bzw. Raum, wirken.
- *Separation in der Zeit*: Die zu verwirklichenden Anforderungen oder Funktionen werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten verwirklicht.

IGP 1. Prinzip der Zerlegung bzw. Segmentierung	IGP 24. Prinzip des "Vermittlers"
IGP 2. Prinzip der Abtrennung	IGP 25. Prinzip der Selbstbedienung
IGP 3. Prinzip der örtlichen Qualität	IGP 26. Prinzip des Kopierens
IGP 4. Prinzip der Asymmetrie	IGP 27. Prinzip der billigen Kurzlebigkeit anstelle teurer Langlebigkeit
IGP 5. Prinzip der Kopplung	IGP 28. Prinzip des Ersatzes mechanischer Wirkprinzipien
IGP 6. Prinzip der Universalität	IGP 29. Prinzip der Anwendung von Pneumo- und Hydrokonstruktionen
IGP 7. Prinzip der "Steckpuppe" (Matrjoschka)	IGP 30. Prinzip der Anwendung biegsamer Hüllen und dünner Folien
IGP 8. Prinzip der Gegenmasse	IGP 31. Prinzip der Verwendung poröser Werkstoffe
IGP 9. Prinzip der vorgezogenen Gegenwirkung	IGP 32. Prinzip der Farbveränderung
IGP 10. Prinzip der vorgezogenen Wirkung	IGP 33. Prinzip der Gleichtartigkeit bzw. Homogenität
IGP 11. Prinzip des "vorher untergelegten Kissens" (Prävention)	IGP 34. Prinzip der Beseitigung und Regenerierung von Teilen
IGP 12. Prinzip des Äquipotenzials	IGP 35. Prinzip der Veränderung des Aggregatzustandes
IGP 13. Prinzip der Funktionsumkehr	IGP 36. Prinzip der Anwendung von Phasenübergängen
IGP 14. Prinzip der Kugelähnlichkeit	IGP 37. Prinzip der Anwendung von Wärmedehnung
IGP 15. Prinzip der Dynamisierung	IGP 38. Prinzip der Anwendung starker Oxidationsmittel
IGP 16. Prinzip der partiellen oder überschüssigen Wirkung	IGP 39. Prinzip der Verwendung eines inerten Mediums
IGP 17. Prinzip des Übergangs zu höheren Dimensionen	IGP 40. Prinzip der Anwendung zusammengesetzter Stoffe
IGP 18. Prinzip der Ausnutzung mechanischer Schwingungen	
IGP 19. Prinzip der periodischen Wirkung	
IGP 20. Prinzip der Kontinuität der Wirkprozesse	
IGP 21. Prinzip des Durcheinlens	
IGP 22. Prinzip der Umwandlung von Schädlichem in Nützliches	
IGP 23. Prinzip der Rückkopplung	

**Abb. 6.36** Innovative Grundprinzipien (IGP) (nach Altschuller 1998)

- *Separation innerhalb eines Objekts und seiner Teile:* Die zu verwirklichenden Anforderungen oder Funktionen werden auf verschiedene Teile des technischen Systems aufgeteilt.
- *Separation durch Bedingungswechsel:* Die Randbedingungen, unter denen die Anforderungen oder Funktionen verwirklicht werden sollen, müssen so geändert werden, dass die Realisierung möglich ist.

Dem *Stoff-Feld-Modell* liegt die Vorstellung zu Grunde, dass jedes technische System aus mindestens zwei Stoffen (z. B. Werkstück und Werkzeug) und einem Feld (z. B. Gravitation) besteht. Durch das Aufstellen der Stoff-Feld-Komponenten eines technischen Systems und deren Analyse können Probleme aufgedeckt und Lösungsmöglichkeiten gefunden werden. Diese Lösungsmöglichkeiten bestehen aus insgesamt 76 sog. Standards, die immer wiederkehrende Lösungsstrategien für ähnliche Problemfälle darstellen.

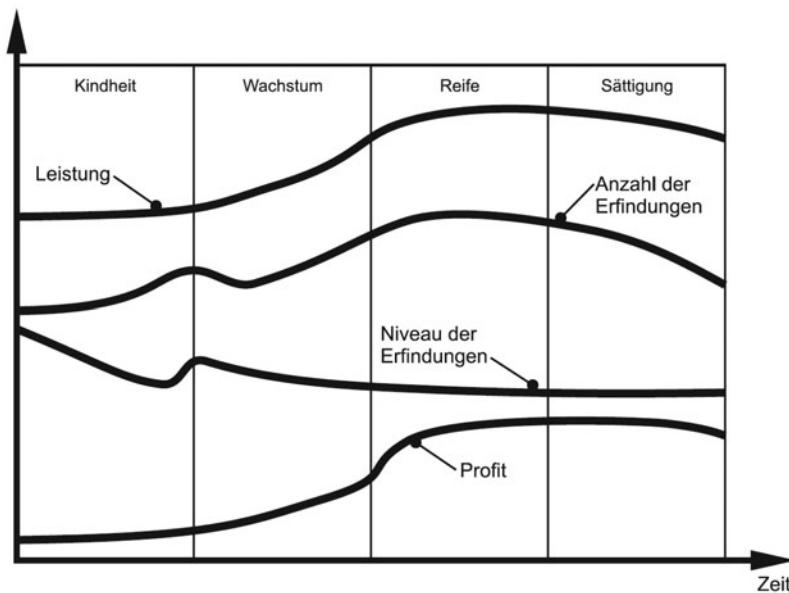
*Vision* Um neue Marktpotenziale aufzudecken, bietet die TRIZ verschiedene Werkzeuge an, die unter den *Evolutionsgesetzen technischer Systeme* zusammengefasst sind. Altschuller stellte hierfür acht Grundmuster der technischen Evolution auf, die dazu dienen, die ge-

	sich verschlechternder Parameter ↓ zu verbessernder Parameter	1. Masse des beweglichen Objekts	2. Masse des unbeweglichen Objekts	...	
1. Masse des beweglichen Objekts	<b>Physikalischer Widerspruch</b>			...	
2. Masse des unbeweglichen Objekts		<b>Physikalischer Widerspruch</b>		...	
...	...	...		<b>Physikalischer Widerspruch</b>	
7. Volumen des beweglichen Objekts	IGPs 2, 26, 29, 40			...	Ph
8. Volumen des unbeweglichen Objekts		IGPs 35, 10, 19, 14		...	

**Abb. 6.37** Auszug aus der Widerspruchsmatrix (nach Altschuller 1998)

nerelle technische Entwicklung und die Entwicklung bestimmter Produkte abzuschätzen. Diese Grundmuster sind:

- Technische Systeme durchlaufen einen Lebenszyklus, der gemäß einer S-Kurve durch die Phasen Kindheit, Wachstum, Reife und Sättigung abgebildet werden kann,
- technische Systeme entwickeln sich in Richtung zunehmender Idealität, d. h., nützliche Funktionen nehmen zu und schädliche Funktionen ab,
- die Teile eines technischen Systems entwickeln sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, so dass jedes Teil eine eigene S-Kurve besitzt. Die potenzielle Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird durch den Teil begrenzt, der als erstes die Reifephase überschreitet,
- technische Systeme entwickeln sich in Richtung größerer Flexibilität und Regelbarkeit,
- technische Systeme werden zunächst komplexer, um dann genial einfach zu werden,
- Teile technischer Systeme entwickeln sich unter gezielter Übereinstimmung oder gezielter Nichtübereinstimmung, um die Leistung des Gesamtsystems zu verbessern,
- technische Systeme entwickeln sich in Richtung zunehmender Miniaturisierung und nutzen zunehmend Felder (z. B. elektrische oder magnetische) und
- technische Systeme benötigen immer weniger Interaktion mit dem Menschen und agieren zunehmend autonom.



**Abb. 6.38** Der Lebenszyklus eines technischen Systems (Herb et al. 2000)

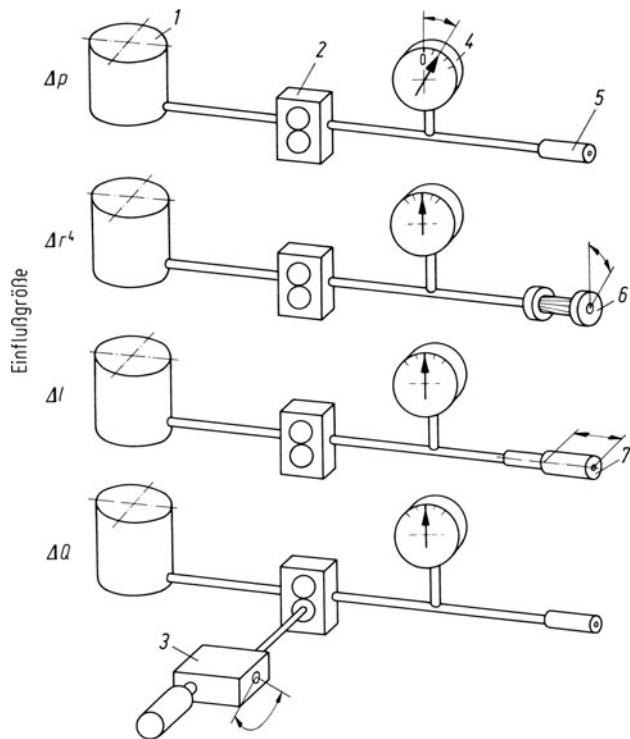
Ein sehr wichtiges Evolutionsprinzip ist der Lebenszyklus eines technischen Systems, der in Form einer S-Kurve dargestellt werden kann (vgl. Abschn. 6.1.2). Der Lebenszyklus wird in die Phasen der Kindheit, des Wachstums, der Reife und der Sättigung unterteilt. Durch die Analyse charakteristischer Merkmale eines technischen Systems kann dessen entsprechende aktuelle Lebensphase identifiziert werden. Auf dieser Grundlage wird die Entscheidung getroffen, ob das System weiterentwickelt werden soll, oder ob die eingesetzte Technologie ausgereizt ist und durch eine neue ersetzt werden muss. Als charakteristische Merkmale eines technischen Systems werden die Leistungsfähigkeit, die Anzahl der Erfindungen, das Niveau der Erfindungen und der Profit betrachtet (s. Abb. 6.38). Die Leistungsfähigkeit kann z. B. durch die Höchstgeschwindigkeit eines Automobils definiert werden. Die Anzahl der Erfindungen gibt wieder, wie dynamisch die Entwicklung einer Technologie während der Lebensphasen verläuft. Das Niveau der Erfindungen gibt an, ob die anmeldeten Patente Meilensteine in der Technologieentwicklung darstellen oder ob es sich nur um kleine Veränderungen der Technologie handelt. Der Profit schließlich bildet den Gewinn ab, der über die Lebensdauer des Produkts erzielt wurde. Diese vier Merkmale werden übereinander aufgetragen und erlauben damit die Identifikation der entsprechenden Produktlebensphase.

#### 4. Diskursiv betonte Methoden

Die diskursiv betonten Methoden ermöglichen Lösungen durch bewusst schrittweises Vorgehen. Die Arbeitsschritte sind beeinflussbar und mitteilsam. Diskursives Vorgehen schließt

**Abb. 6.39** Schematische Darstellung von vier Viskosimetern (nach Rodenacker 1991).

1 Behälter, 2 Zahnradpumpe, 3 Stellgetriebe, 4 Manometer, 5 feste Kapillare, 6 Kapillare mit veränderbarem Durchmesser, 7 Kapillare mit veränderbarer Länge



Intuition nicht aus. Diese soll stärker für die Einzelschritte und Einzelprobleme benutzt werden, nicht aber sofort zur Lösung der Gesamtaufgabe.

**Systematische Untersuchung des physikalischen Zusammenhangs** Ist zur Lösung einer Aufgabe bereits der physikalische (chemische, biologische) Effekt bzw. die ihn bestimmende physikalische Gleichung bekannt, so lassen sich insbesondere bei Beteiligung von mehreren physikalischen Größen verschiedene Lösungen dadurch ableiten, dass man die Beziehung zwischen ihnen, also den Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer unabhängigen Veränderlichen analysiert, wobei alle übrigen Einflussgrößen konstant gehalten werden. Liegt z. B. eine Gleichung der Form  $y = f(u, v, w)$  vor, so werden nach dieser Methode Lösungsvarianten für die Beziehung  $y_1 = f(\underline{u}, \underline{v}, \underline{w})$ ,  $y_2 = f(\underline{u}, v, \underline{w})$  und  $y_3 = f(\underline{u}, \underline{v}, w)$  untersucht, wobei jeweils die unterstrichenen Größen konstant bleiben sollen.

Rodenacker gibt Beispiele für dieses Vorgehen, wovon eines die Entwicklung eines Kapillarviskosimeters darstellt (Rodenacker 1991). Von dem bekannten physikalischen Gesetz einer Kapillare  $\eta \sim \Delta p \cdot r^4 / (Q \cdot l)$  ausgehend, werden vier Lösungsvarianten abgeleitet. Abbildung 6.39 zeigt diese in prinzipieller Anordnung:

1. Eine Lösung, bei der der Differenzdruck  $\Delta p$  als Maß der Viskosität,  $\Delta p \sim \eta$ , ausgenutzt wird ( $Q, r$  und  $l = \text{const.}$ ).

2. Eine Lösung, bei der der Kapillardurchmesser,  $\Delta r \sim \eta$ , herangezogen wird ( $Q, \Delta p$  und  $l = \text{const.}$ ).
3. Eine Lösung unter Ausnutzung einer Längenveränderung der Kapillare,  $\Delta l \sim \eta(\Delta p, Q$  und  $r = \text{const.}$ ).
4. Eine Lösung, bei der die Durchflussmenge verändert wird,  $\Delta Q \sim \eta(\Delta p, r$  und  $l = \text{const.}$ ).

Eine weitere Möglichkeit, durch die Analyse physikalischer Gleichungen zu neuen oder verbesserten Lösungen zu kommen, liegt darin, bekannte physikalische Wirkungen in Einzeleffekte zu zerlegen. So hat vor allem Rodenacker (1991) eine solche Aufgliederung komplexer physikalischer Beziehungen in Einzeleffekte dazu benutzt, völlig neue Geräte zu bauen bzw. für bekannte Geräte neue Anwendungen zu entwickeln.

Zur Erläuterung eines solchen Verfahrens wird für die Entwicklung einer reibschlüssigen Schraubensicherung die bekannte physikalische Beziehung für das Lösen einer Schraube analysiert:

$$T_L = F_V \left[ \left( \frac{d_2}{2} \right) \tan (\varrho_G - \beta) + \left( \frac{D_M}{2} \right) \mu_M \right] \quad (6.1)$$

In Gl. (6.1) sind folgende Teildrehmomente enthalten: Reibmoment im Gewinde:

$$T_G \sim F_V \left( \frac{d_2}{2} \right) \tan \varrho_G = F_V \left( \frac{d_2}{2} \right) \mu_G \quad (6.2)$$

wobei

$$\tan \varrho_G = \frac{\mu}{\cos \left( \frac{\alpha}{2} \right)} = \mu_G$$

Reibmoment an der Kopf- bzw. Mutterauflage:

$$T_M = F_V \left( \frac{D_M}{2} \right) \tan \varrho_M = F_V \left( \frac{D_M}{2} \right) \mu_M \quad (6.3)$$

Losdrehmoment der Schraube, herrührend von der Vorspannkraft und der Gewindesteigung:

$$T_{Lo} \sim \left( \frac{F_V d_2}{2} \right) \tan (-\beta) = -F_V \frac{P}{2\pi} \quad (6.4)$$

( $P$  Gewindesteigung,  $\beta$  Steigungswinkel,  $d_2$  Flankendurchmesser,  $F_V$  Schraubenvorspannkraft,  $D_M$  mittlerer Auflagedurchmesser,  $\mu_G$  fiktiver Reibwert im Gewinde,  $\mu$  tatsächlicher Reibwert der Gewinde-Werkstoffpaarung,  $\mu_M$  Reibwert an der Kopf- bzw. Mutterauflage,  $\alpha$  Flankenwinkel).

Zum Erkennen von Wirkprinzipien zur Verbesserung der Sicherung gegen Lösen der Schraube ist es nun sinnvoll, die aufgestellten physikalischen Beziehungen weiter nach den vorkommenden physikalischen Effekten zu analysieren.

Als Einzeleffekte stecken in den Gl. (6.2) und (6.3):

- Reibungseffekt (Coulombsche Reibkraft)

$$F_{RG} = \mu_G \cdot F_V \quad \text{bzw.} \quad F_{RM} = \mu_M \cdot F_V$$

- Hebeleffekt

$$T_G = F_{RG} \cdot \frac{d_2}{2} \quad \text{bzw.} \quad T_M = F_{RM} \cdot \frac{D_M}{2}$$

- Keileffekt

$$\mu_G = \frac{\mu}{\cos(\alpha/2)}$$

Einzeleffekte der Gl. (6.4):

- Keileffekt

$$F_{Lo} \sim F_V \cdot \tan(-\beta)$$

- Hebeleffekt

$$T_{Lo} = F_{Lo} \cdot \frac{d_2}{2}$$

Bei der Betrachtung der einzelnen physikalischen Effekte lassen sich z. B. folgende Wirkprinzipien zur Verbesserung der Schraubensicherung angeben:

- Ausnutzung des Keileffekts zur Herabsetzung der Lösekraft durch Verkleinern des Steigungswinkels  $\beta$ ,
- Ausnutzung des Hebeleffekts zur Vergrößerung des Reibmoments an der Kopf- bzw. Mutterauflage durch Vergrößerung des Auflagedurchmessers  $D_M$ ,
- Ausnutzung des Reibungseffekts zur Erhöhung der Reibkräfte durch Vergrößerung des Reibungskoeffizienten  $\mu$ ,
- Ausnutzung des Keileffekts zur Vergrößerung der Reibkraft an der Auflage durch kegelförmige Auflagefläche ( $F_V \cdot \mu / \sin \gamma$  mit  $2\gamma$  Kegelwinkel), Beispiel: Kfz-Radnabenbefestigung, und
- Vergrößerung des Flankenwinkels  $\alpha$  zur Erhöhung des fiktiven Gewindereibwertes.

**Abb. 6.40** Allgemeiner Aufbau von Ordnungsschemata (nach Dreibholz 1975)

a

Ordnender Gesichtspunkt für die Spaltenbenennung		Spaltenparameter			
Ordnender Gesichtspunkt für die Zeilenbenennung		S1	S2	S3	S4
Zeilenparameter	Z1				
	Z2				
	Z3				
	Z4				

b

Numerierung (Ifd. Nr.)		Spaltenparameter			
Ordnender Gesichtspunkt für die Zeilenbenennung		1	2	3	4
Zeilenparameter	Z1				
	Z2				
	Z3				
	Z4				

**Systematische Suche mit Hilfe von Ordnungsschemata** Bereits bei den allgemein wiederkehrenden Arbeitsmethoden (vgl. Abschn. 5.1.3) wurde festgestellt, dass eine Systematisierung und geordnete Darstellung von Informationen bzw. Daten in zweierlei Hinsicht sehr hilfreich sind. Einerseits regt ein Ordnungsschema zum Suchen nach weiteren Lösungen in bestimmten Richtungen an, andererseits wird das Erkennen wesentlicher Lösungsmerkmale und entsprechender Verknüpfungsmöglichkeiten erleichtert. Aufgrund dieser Vorteile sind eine Reihe von Ordnungssystemen bzw. Ordnungsschemata entstanden, die alle einen im Prinzip ähnlichen Aufbau haben. In einer Zusammenstellung hat Dreibholz (1975) über die Möglichkeiten für solche Ordnungsschemata ausführlich und umfassend berichtet.

Das allgemein übliche zweidimensionale Schema besteht aus Zeilen und Spalten, denen Parameter zugeordnet werden, die unter „Ordnende Gesichtspunkte“ zusammengefasst sind. Abbildung 6.40 zeigt den allgemeinen Aufbau von Ordnungsschemata, wenn für Zeilen und Spalten jeweils Parameter vorgesehen sind a) und für den anderen Fall, wenn Parameter nur für Zeilen zweckmäßig sind b), weil eine Ordnung für die Spalten nicht sichtbar wurde. Ist es zur Informationsdarstellung oder zum Erkennen möglicher Merkmalsverknüpfungen zweckmäßig, können die „Ordnenden Gesichtspunkte“ durch eine weitergehende Parameter- bzw. Merkmalsaufgliederung nach Abb. 6.41 erweitert werden,

		S 1										S 2
		S 11					S 12					S 21
		S 111		S 112			S 121			S 122		S 211
		S1111	S1112	S1121	S1122	S1211	...					
Z1	Z11	Z1111										
		Z1112										
		Z1113										
		Z1121										
		Z1122										
	Z113	Z1123										
		Z1131										
		...										
		Z121										
		Z122										
Z2	Z21	Z211										
		Z212										

**Abb. 6.41** Ordnungsschemata mit erweiterter Parameteraufgliederung (nach Dreibholz 1975)

was aber schnell zu einer Unübersichtlichkeit führt. Durch Zuordnen der Spaltenparameter zu den Zeilen lässt sich jedes Ordnungsschema mit Zeilen- und Spaltenparametern in ein Schema überführen, bei dem nur noch Zeilenparameter vorhanden sind und die Spalten eine Nummerierung erhalten, s. Abb. 6.42.

Solche Ordnungsschemata sind beim Konstruktionsprozess recht vielfältig einsetzbar. So können sie als Lösungskataloge mit geordneter Speicherung von Lösungen je nach Art und Komplexität in allen Phasen zur Lösungssuche dienen. Zum Erarbeiten von Gesamtlösungen aus Teillösungen können sie als Kombinationshilfe eingesetzt werden. Zwicky (1971) hat ein solches Hilfsmittel als „Morphologischen Kasten“ bezeichnet.

Entscheidende Bedeutung kommt der Wahl der „Ordnenden Gesichtspunkte“ bzw. ihrer Parameter zu. Beim Aufstellen eines Ordnungsschemas geht man zweckmäßigerweise schrittweise vor:

- Zunächst wird man in die Zeilen Lösungsvorstellungen in ungeordneter Reihenfolge eintragen,

**Abb. 6.42** Modifiziertes Ordnungsschema (nach Dreibholz 1975)

	1	2	3	4	5
S1	Z1				
S2	Z1				
S3	Z1				
	Z2				
	Z3				
	Z4				
	...				
S1	Z1				
S2	Z1				
S3	Z1				
	Z2				
	Z3				
	Z4				
	...				

- diese dann im zweiten Schritt nach kennzeichnenden Merkmalen analysieren, z. B. Energieart, Wirkgeometrie, Bewegungsart und dergleichen, und
- schließlich im dritten Schritt nach solchen Merkmalen ordnen.

Ist eine Analyse bekannter Lösungen oder eine Auswertung von Lösungsideen nach intuitiv betonten Methoden vorangegangen, lassen sich daraus Merkmale bzw. „Ordnende Gesichtspunkte“ für ein Ordnungsschema ebenfalls gewinnen.

Dieses Vorgehen ist nicht nur zum Erkennen der Verträglichkeiten bei einer Kombination hilfreich, sondern regt vor allem an, ein möglichst reichhaltiges Lösungsfeld zu erarbeiten. Dabei können die für maschinenbauliche Systeme in Abb. 6.43 und 6.44 zusammengestellten ordnenden Gesichtspunkte und Merkmale zur systematischen Lösungssuche und zur Variation eines Lösungsansatzes zweckmäßig sein. Sie beziehen sich auf Energiearten, physikalische Effekte und Erscheinungsformen, wie aber auch auf Merkmale der Wirkgeometrie, der Wirkbewegung und der prinzipiellen Stoffeigenschaften.

Als einfaches Beispiel einer Lösungssuche für eine Teilfunktion diene Abb. 6.45, bei dem man durch Variation der Energieart zu unterschiedlichen Wirkprinzipien zur Erfüllung einer Funktion gekommen ist.

In Abb. 6.46 ist ein Beispiel für die Variation nach den Wirkbewegungen dargestellt.

**Abb. 6.43** Ordnende Gesichtspunkte und Merkmale zur Variation auf physikalischer Suchebene

<u>Ordnende Gesichtspunkte:</u>	
Energiearten, physikalische Effekte und Erscheinungsformen	
<b>Merkmale:</b>	<b>Beispiele:</b>
Mechanisch:	Gravitation, Trägheit, Fliehkraft
Hydraulisch:	hydrostatisch, hydrodynamisch
Pneumatisch:	aerostatisch, aerodynamisch
Elektrisch:	elektrostatisch, elektrodynamisch induktiv, kapazitiv, piezoelektrisch Transformation, Gleichrichtung
Magnetisch:	ferromagnetisch, elektromagnetisch
Optisch:	Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz, Polarisation, infrarot, sichtbar, ultraviolet
Themisch:	Ausdehnung, Bimetalleffekt, Wärmespeicher, Wärmeübertragung, Wärmeleitung, Wärmeisolierung
Chemisch:	Verbrennung, Oxidation, Reduktion auflösen, binden, umwandeln Elektrolyse exotherme, endotherme Reaktion
Nuklear:	Strahlung, Isotopen, Energiequelle
Biologisch:	Gärung, Verrottung, Zersetzung

Abbildung 6.47 zeigt eine Variation der Wirkgeometrie bei der Verbindung von Wellen und Nabben. Hierdurch kann die Lösungsvielfalt, die z.B. durch „Vorwärtsschreiten“ erreicht wird (vgl. Abschn. 5.1.3, s. Abb. 5.4), geordnet und vervollständigt werden.

Zusammenfassend können folgende Empfehlungen ausgesprochen werden:

- Ordnungsschemata schrittweise aufbauen, korrigieren und weitgehend vervollständigen. Unverträglichkeiten beseitigen und nur lösungsträchtige Ansätze weiterverfolgen. Dabei analysieren, welche „Ordnenden Gesichtspunkte“ zur Lösungsfundung beitragen, diese durch Parameter näher variieren, evtl. aber auch verallgemeinern oder einschränken,
- mit Hilfe von Auswahlverfahren günstig erscheinende Lösungen aussuchen und kennzeichnen und
- Ordnungsschemata möglichst allgemeingültig zur Wiederverwendung aufbauen, aber nicht Systematik um der Systematik willen betreiben.

**Verwendung von Katalogen** Kataloge sind eine Sammlung bekannter und bewährter Lösungen für bestimmte konstruktive Aufgaben oder Teilfunktionen. Kataloge können Informationen recht verschiedenen Inhalts und Lösungen unterschiedlichen Konkretisierungsgrades enthalten. So können in ihnen physikalische Effekte, Wirkprinzipien,

**Ordnende Gesichtspunkte :**

Wirkgeometrie, Wirkbewegung und prinzipielle Stoffeigenschaften

**Wirkgeometrie (Wirkkörper, Wirkfläche)**

Merkmaile :	Beispiele :
Art :	Punkt, Linie, Fläche, Körper
Form :	Rundung, Kreis, Ellipse, Hyperbel, Parabel Dreieck, Quadrat, Rechteck, Fünf-, Sechs-, Achteck Zylinder, Kegel, Rhombus, Würfel, Kugel symmetrisch, asymmetrisch
Lage :	axial, radial, tangential, vertikal, horizontal parallel, hintereinander
Größe :	klein, groß, schmal, breit, niedrig, hoch
Zahl :	einfach, doppelt, mehrfach ungeteilt, geteilt

**Wirkbewegung**

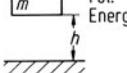
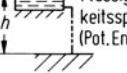
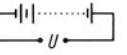
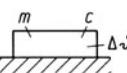
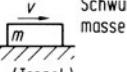
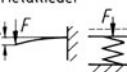
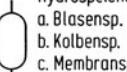
Merkmaile :	Beispiele :
Art :	ruhend, translatorisch, rotatorisch
Form :	gleichförmig, ungleichförmig, oszillierend sowie eben oder räumlich
Richtung :	in x, y, z - Richtung und / oder um x, y, z - Achse
Betrag :	Höhe der Geschwindigkeit
Zahl :	eine, mehrere, zusammengesetzte Bewegungen

**Prinzipielle Stoffeigenschaften**

Merkmaile :	Beispiele :
Zustand :	fest, flüssig, gasförmig
Verhalten :	starr, elastisch, plastisch, zähflüssig
Form :	Festkörper, Körner, Pulver, Staub

**Abb. 6.44** Ordnende Gesichtspunkte und Merkmale zur Variation auf geometrischer und stofflicher Suchebene

prinzipielle Lösungen für komplexe Aufgabenstellungen, Maschinenelemente, Normteile, Werkstoffe, Zukaufteile und dergleichen gespeichert sein. Die bisherigen Quellen für solche Daten waren Fach- und Handbücher, Firmenkataloge, Prospektsammlungen, Normenhandbücher und Ähnliches. Ein Teil von ihnen enthält neben reinen Objektangaben und Lösungsvorschlägen auch Angaben über Berechnungsverfahren, Lösungsmethoden sowie sonstige Konstruktionsregeln. Auch für letztere sind katalogartige Sammlungen denkbar.

Energieart Wirkprinzip	mechanisch	hydraulisch pneumatisch	elektrisch	thermisch
1	 Pot. Energie	 Flüssigkeitssp. (Pot. Energ.)	 Batterie	 Masse
2	 Schwung-masse (Transl.)	Strömende Flüssigkeit	 Kondensator (elektr. Feld)	Aufgeheizte Flüssigkeit
3	 Schwung-rad (Rot.)			Überhitzter Dampf
4	 Rad auf schiefer Ebene (Rot.-Transl.-Pot.)			
5	 Metallfeder	Sonstige Federn (Kompr. v. Fl.+Gas)		
6		 Hydrospeicher a. Blasensp. b. Kolbensp. c. Membransp. (Druckenergie)		

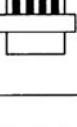
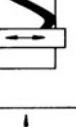
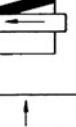
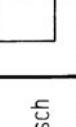
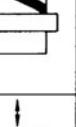
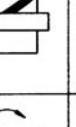
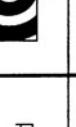
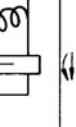
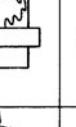
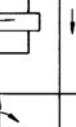
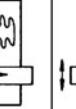
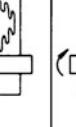
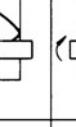
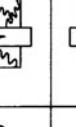
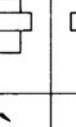
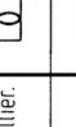
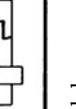
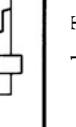
**Abb. 6.45** Unterschiedliche Wirkprinzipien zum Erfüllen der Funktion „Energie speichern“ bei Variation der Energieart

An Konstruktionskataloge sind folgende Forderungen zu stellen:

- schneller, aufgabenorientierter Zugriff zu den gesammelten Lösungen bzw. Daten,
- weitgehende Vollständigkeit des gesammelten Lösungsspektrums. Zumindest muss eine Ergänzung möglich sein,
- möglichst weitgehend branchen- und firmenunabhängig, um breit einsetzbar zu sein,
- eine Anwendung sollte sowohl beim herkömmlichen Konstruktionsablauf als auch beim Rechnereinsatz möglich sein.

Mit dem Aufbau und der Entwicklung von Katalogen hat sich vor allem Roth mit seinen Mitarbeitern beschäftigt (Roth 1996, 2000, 2001). Er schlägt zum Erfüllen der genannten Forderungen einen grundsätzlichen Aufbau gemäß Abb. 6.48 vor.

Der Gliederungsteil bestimmt den systematischen Aufbau des Katalogs. Entscheidende Bedeutung kommt auch hier den ordnenden Gesichtspunkten zu. Sie beeinflussen die Handhabbarkeit und den schnellen Zugriff. Sie richten sich nach dem Konkretisierungsgrad

Auftragsvorrichtung Streifen	$A_1$ ruhend	$A_2$ translatorisch	$A_3$ oszillierend	$A_4$ rotierend	$A_5$ rotier.+ translat.	$A_6$ rotier.+ oszillier.	$A_7$ oszillier.+ translat.
$B_1$ ruhend							
$B_2$ translatorisch							
$B_3$ oszillierend							
$B_4$ rotierend							
$B_5$ rotier.+ translat.							
$B_6$ rotier.+ oszillier.							
$B_7$ oszillier.+ translat.							

**Abb. 6.46** Möglichkeiten zum Beschichten von Teppichbahnen durch Kombination von Bewegungen der Teppichbahn (allg. Streifen) und der Auftragsvorrichtung

Variante	1	2	3	4	5	6
Merkmal						
Art						
Form						
Lage						
Größe						
Zahl						

**Abb. 6.47** Variation der Wirkgeometrie bei formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen

Gliederungsteil			Hauptteil		Nr.	Zugriffsteil					Anhang		
1	2	3	1	2		1	2	3	4	5	1	2	3
1	2	3			1								
					2								
		3			3								
					4								
	6	7			5								
					6								
		7			7								

**Abb. 6.48** Grundsätzlicher Aufbau von Konstruktionskatalogen nach (Roth 1996, 2000, 2001)

und der Komplexität der gespeicherten Lösungen sowie nach der Konstruktionsphase, für die der Katalog eingesetzt werden soll. Für die Konzeptphase ist es z. B. zweckmäßig, als Gliederungsgesichtspunkte die von den Lösungen zu erfüllenden Funktionen zu wählen, da die Konzepterarbeitung ja von den Teifunktionen ausgeht. Diese Gliederungsmerkmale sollten die allgemein anwendbaren Funktionen sein, um die Lösungen möglichst produktunabhängig abrufen zu können. Weitere Gliederungsgesichtspunkte können z. B. Art und Merkmale von Energie (mechanische, elektrische, optische usw.), Stoff oder Signal, Wirkgeometrie, Wirkbewegung und prinzipielle Stoffeigenschaft sein. Bei Katalogen zur Entwurfsphase sind entsprechende Gliederungsgesichtspunkte zweckmäßig, z. B. Werkstoffeigenschaften, Schlussarten von Verbindungen, Schaltungsarten bei Kupplungen und Merkmale konkreter Maschinenelemente.

Der Hauptteil enthält den eigentlichen Inhalt des Katalogs. In ihm sind die Objekte dargestellt. Je nach Konkretisierungsgrad werden die Objekte als Strichskizze, mit oder ohne physikalische Gleichung, oder als mehr oder weniger vollständige Zeichnung bzw. Abbildung wiedergegeben. Die Art und Vollständigkeit der Darstellung richtet sich nach der Anwendungsphase. Wichtig ist, dass alle Informationen auf der gleichen Abstraktionsstufe stehen und von Nebensächlichkeiten befreit sind.

Im Zugriffsteil sind die Eigenschaften der jeweiligen Objekte zusammengetragen. Nach ihnen kann im jeweiligen Einzelfall das geeignete Objekt ausgewählt werden.

Ein Anhang ermöglicht die Angabe über Herkunft und von ergänzenden Anmerkungen.

Die Auswahlmerkmale können unterschiedlichste Eigenschaften beinhalten wie z. B. charakteristische Abmessungen, Einfluss bzw. Auftreten bestimmter Störgrößen, Federungsverhalten, Zahl der Elemente und dergleichen. Sie dienen dem Konstrukteur zur Vorauswahl und Beurteilung von Lösungen und können bei DV-gespeicherten Katalogen Kenngrößen für den Auswahl- und Bewertungsvorgang sein.

Eine weitere wichtige Forderung zum Aufbau von Katalogen ist die Verwendung einheitlicher und eindeutiger Definitionen und Symbole zur Informationsdarstellung.

Je konkreter und ins Einzelne gehend die gespeicherten Informationen sind, umso unmittelbarer, aber auch begrenzter ist der Katalog einsetzbar. Mit zunehmender Konkretisierung steigt die Vollständigkeit der Angaben über eine bestimmte Lösungsmöglichkeit, aber die Möglichkeit für ein vollständiges Lösungsspektrum fällt, da die Vielfalt der Details, z. B. bei den Gestaltungsvarianten, enorm wächst. So ist es möglich, die zur Erfüllung der Funktion „Leiten“ in Frage kommenden physikalischen Effekte vollständig zusammenzustellen, es dürfte aber kaum möglich sein, eine Vollständigkeit aller Gestaltungsmöglichkeiten, z. B. von Lagerungen (Kraft vom rotierenden zum ruhenden System leiten), zu erreichen.

---

## 6.4 Auswahl- und Bewertungsmethoden (Sandro Wartzack)

Im Lösungsfindungsprozess wird eine große Anzahl möglicher Lösungen erarbeitet. Damit wird der Lösungsraum erweitert. Bei der Bewertung hingegen wird eine Fokussierung auf eine oder einige wenige Alternativen herbeigeführt. Entscheidungen über die zu ver-

folgenden Alternativen, die eine zentrale Bedeutung im Hinblick auf den Fortschritt im Produktentwicklungsprozess einnehmen, müssen systematisch und nachvollziehbar getroffen werden.

Entscheidungsaufgaben weisen nach Bauer (2010); Sen und Yang (1998) folgende Charakteristika auf:

- Es existiert eine Reihe möglicher Handlungsalternativen bzw. Lösungsalternativen,
- jede Handlungsalternative ist durch eine Reihe von Konsequenzen charakterisiert, von denen einige vorteilhaft bzw. erwünscht sind, andere jedoch nachteilig bzw. unerwünscht.
- Aufgabe des Entscheiders ist es, vor der Auswahl einer oder mehrerer Alternativen deren vorteilhafte und nachteilige Konsequenzen abzuwägen. Dies erfolgt mittels Anwendung bestimmter Vorgehensweisen zur Bestimmung bzw. Kommunikation von Präferenzen.

Diese Charakteristika prägen den Prozess der Entscheidungsfindung: Es muss also zunächst die Synthese einer Reihe konkurrierender Lösungskonzepte bzw. Lösungsentwürfe erfolgen, der sich eine Auswahl bevorzugter Varianten anschließt (Sen 2001). Auswahl- und Bewertungsmethoden unterstützen diesen Prozess.

Aufbauend auf einer allgemeingültigen Vorgehensweise zur Bewertung technischer Systeme werden im Folgenden für die Entscheidungsfindung relevante Aspekte beleuchtet: Bewertungsverfahren verschiedenster Komplexität und für unterschiedlichste Entscheidungsaufgaben, Rechnerunterstützung sowie die Betrachtung von Bewertungsunsicherheiten. Dem Leser soll somit ein strukturierter Einstieg in die Entscheidungsfindung unter dem Einsatz von Bewertungsverfahren ermöglicht werden.

**Zweck und Zielsetzung von Bewertungsverfahren** Zweck und Zielsetzung von Bewertungsverfahren ist es, eine Unterstützung für die Entscheidungsfindung bei einer Auswahl aus mehreren potenziellen Varianten oder Lösungsmöglichkeiten zu geben. Dazu müssen Bewertungsverfahren den Entscheider in die Lage versetzen, diejenigen Risiken, die bestimmte Lösungsmöglichkeiten mit sich bringen, frühzeitig zu erkennen, um ggf. geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten zu können. Ein weiterer Grund für den Einsatz von Bewertungsverfahren ist die Forderung nach einer späteren Nachvollziehbarkeit der getroffenen Entscheidung: Diese wird durch geeignete Bewertungsverfahren gewährleistet, indem objektive Beurteilungen der Situation gemeinsam mit den zu erwartenden Konsequenzen der einzelnen Handlungsalternativen festgehalten werden.

Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass eine Anwendung von Bewertungsverfahren in den verschiedensten Phasen des Produktentwicklungsprozesses möglich und nötig ist: In der Planungsphase stellen sich den Entwicklern z. B. Bewertungsaufgaben hinsichtlich der grundsätzlichen Ausrichtung und Positionierung des zu entwickelnden Produktes, während in der Konzeptfindung eher die vergleichende Bewertung mehrerer Konzepte bzw. Entwürfe und eine anschließende Auswahl der besten Lösung im Fokus stehen. Daher gibt es eine Vielzahl an Bewertungsverfahren, die auf bestimmte Anwendungen maßgeschneidert sind und somit für den Einsatz zu bestimmten Zeitpunkten im Entwicklungsprozess prädestiniert

sind. Unterschieden werden dabei – in Analogie zur Auswahl von Berechnungsverfahren nach Mertens (1998); N.N. (2003) – einfache (C-), aufwändige (B-) und komplexe (A-) Verfahren, die sich hinsichtlich ihrer Eignung für die verschiedenen Entscheidungsaufgaben und des Zeitaufwands erheblich unterscheiden.

Der Einsatz bestimmter Bewertungsverfahren ist jedoch nicht immer auf einen bestimmten Abschnitt des Entwicklungsprozesses begrenzt: Wird ein bestimmter Indikator, der Aufschluss über die Ausprägung einer bestimmten Produkteigenschaft gibt, über einen längeren Zeitraum hinweg immer wieder mit demselben Bewertungsverfahren gemessen, so kann dadurch ein Monitoring der zeitlichen Entwicklung dieses Kennwertes über den Verlauf des Produktentwicklungsprozesses hinweg erreicht werden. Auch wenn der Fokus im Folgenden mehr auf der Bewertung mehrerer Lösungsvarianten zur anschließenden Auswahl der besten Variante liegen soll, erlauben Bewertungsverfahren damit auch die Überwachung des Produktreifegrads über die Projektlaufzeit hinweg.

Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass im Folgenden der Fokus auf Bewertungsverfahren und dem zugehörigen Vorgehen und nicht auf Systemanalyseverfahren, wie z. B. die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), liegt.

**Allgemeine Vorgehensweise bei der Bewertung und Überblick** Eine Bewertung soll den Wert bzw. Nutzen oder die Stärken/Schwächen einer Lösung bzw. eines Produktes in Bezug auf das vorher definierte Zielsystem ermitteln. Somit stellt eine Bewertung nach DIN EN ISO 9000 ff. eine „Tätigkeit zur Ermittlung der Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit der Betrachtungseinheit, festgelegte Ziele zu erreichen“ dar (N.N. 2005). Dieses Zielsystem repräsentiert Anforderungen an das Produkt sowie allgemeine Rahmenbedingungen, unter denen das Produkt entwickelt und eingesetzt werden soll. Um die Eignung einer Lösung bezüglich des erstellten Zielsystems zu bewerten, sind dabei „für eine endliche Menge von Lösungen beliebiger Art aus beliebigen Fachgebieten und in beliebigen Reifegraden jedoch gleichen Informationsgehaltes“ gemeinsame Bewertungskriterien aufzustellen, diese mit einheitlich erfassbaren und vergleichbaren Werten zu versehen (Wertungszahlen) und deren Summen (Wertigkeiten) als Wertvergleich gegenüberzustellen (Breiling und Knosala 1997). So kann durch den höchsten Wert die beste und durch den niedrigsten Wert die schlechteste Lösung ermittelt werden.

Zur Durchführung dieser Tätigkeitsschritte sind Verfahren notwendig, die eine umfassende Bewertung komplexer Produkte erlauben. Um in den unterschiedlichen Phasen des Produktentwicklungsprozesses einsetzbar zu sein, müssen diese Verfahren nicht nur quantitativ vorliegende Eigenschaften der Varianten (z. B. Verformung unter Last) verarbeiten können, sondern auch qualitative Eigenschaften (z. B. ästhetisches Erscheinungsbild), wie sie beispielsweise in der frühen Konzeptphase mit dem entsprechend geringen Konkretisierungsgrad vorhanden sind. Dabei folgen diese Methoden nach Breiling und Knosala alle einem prinzipiell ähnlichem Ablauf (s. Abb. 6.49: (Adunka 2002)).

Vor allem bei Bewertungsverfahren, welche auf rein subjektiven Abschätzungen beruhen, ist eine Bewertergruppe unerlässlich. Um die Subjektivität weitgehend zu eliminieren, sollte die Gruppe aus mehreren Personen bestehen, die aus unterschiedlichen Konstruktions-

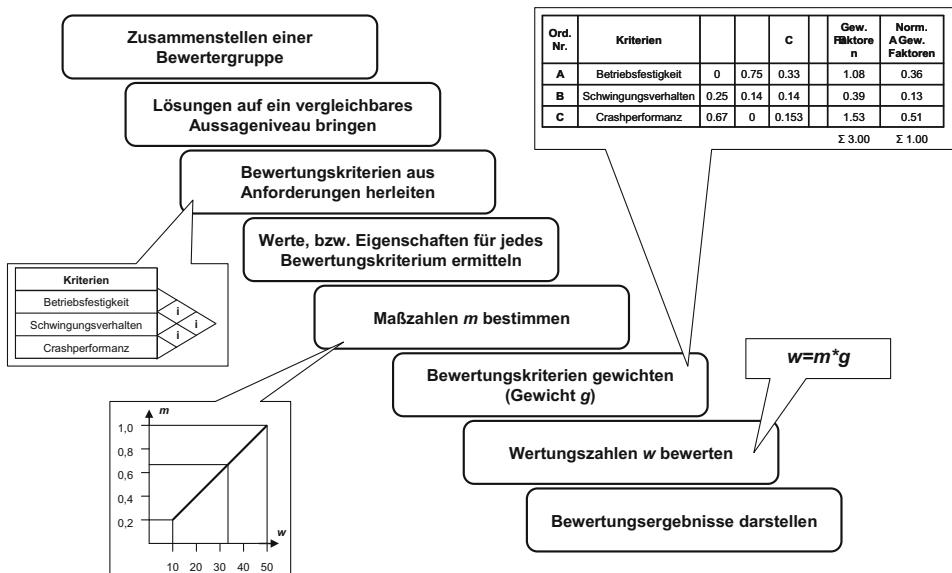
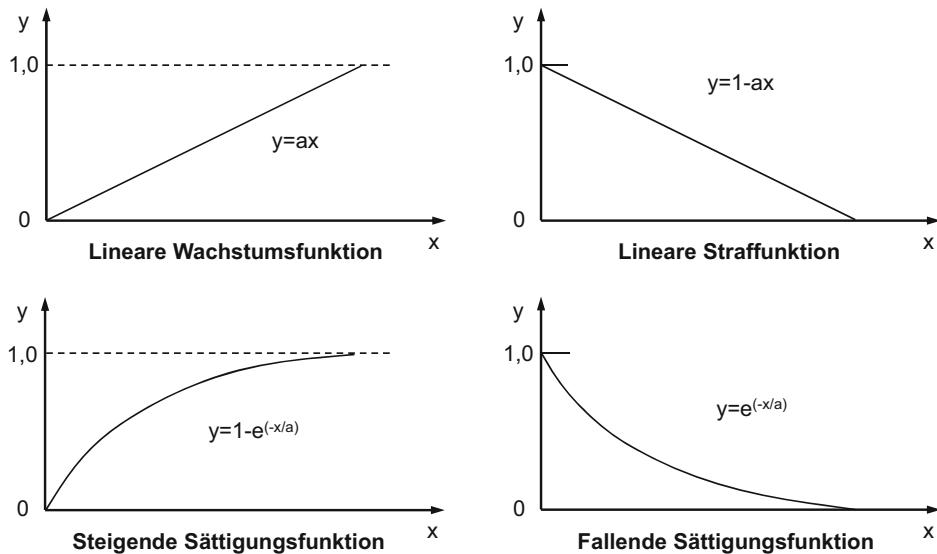


Abb. 6.49 Generischer Ablauf einer Bewertung (Adunka 2002)

und Betriebsbereichen kommen, um ein weitgefächertes und interdisziplinäres Meinungs- und Expertenbild zu gewährleisten. Anschließend müssen die Lösungsalternativen auf ein vergleichbares Niveau gebracht werden, um einer Fehlbewertung aufgrund eines unterschiedlichen Detaillierungsgrades entgegenzuwirken.

Als Umsetzung der Anforderungen bei einer Bewertung dienen Bewertungskriterien, die quantitative oder qualitative Größen darstellen und objektiv oder subjektiv ermittelt bzw. gemessen und beurteilt werden können. Bei dieser Spezifikation kann zwischen einem Top-down- und einem Bottom-up-Vorgehen unterschieden werden. Während bei der Top-down-Zielableitung Anforderungen auf Gesamtproduktebene im Laufe der Entwicklung zu Bewertungskriterien detailliert werden, werden bei einem Bottom-up-Vorgehen die Bewertungskriterien aus der Komponentensicht heraus definiert. Bei der Definition der Bewertungskriterien gilt es außerdem, alle Anforderungen, die das Produkt während seines Produktlebenszyklus erfüllen muss, zu berücksichtigen. Weiterhin sollten die Bewertungskriterien folgende Voraussetzungen weitgehend erfüllen (Breining und Knosala 1997; Maletz 2008; Bachmann 2007):

1. Bewertungskriterien müssen gleicher Natur sein, d. h. K.O.-Kriterien dürfen nicht mit unkritischeren Aspekten gemischt werden.
2. Es dürfen nur Kriterien aufgestellt werden, die für alle Varianten gültig sind.
3. Kriterien müssen frei von Dopplungen und Gleichläufigkeit sein.
4. Kriterien müssen frei von Widersprüchen sein.
5. Kriterien müssen auf Gegenläufigkeit geprüft sein.



**Abb. 6.50** Gebräuchliche Wertfunktionen (nach Zangemeister 1970)

6. Mehrere Kriterien sind, wenn möglich, zu einem mehrdimensionalen Wert zusammenzusetzen, um die Komplexität der Bewertung zu reduzieren.
7. Die aufgestellten Kriterien müssen die Anforderungen vollständig erfassen.

Sind die Kriterien gemäß obiger Arbeitsschritte aufgestellt, geprüft und zueinander gewichtet, so muss für jedes Bewertungskriterium je Lösungsvariante ein entsprechender Wert ermittelt werden (Beispiel Fahrzeugtür: Kriterium: Türabsenkung – Wert: 7 mm). Diese können nun in diskrete Maßzahlen  $m_{ij}$  umgewandelt werden. Dabei muss der zunächst frei wählbare Maßzahlbereich während des Bewertungsprozesses durchgängig beibehalten werden (Adunka 2002) (z. B. auf einer Skala von 0 bis 10).

Hilfreich bei der konsistenten Ermittlung/Verwendung einer Punkteskala können Wertfunktionen sein. Für die Zuordnung von Punkten zu den Eigenschaftsgrößen der Varianten ist es notwendig, dass der Beurteiler sich über die Beurteilungsspanne (Spanne der Eigenschaftsgrößen) und über den qualitativen Verlauf der sog. „Wertfunktion“ im Klaren wird. In Abb. 6.50 werden verschiedene Wertfunktionen aufgezeigt. Eine Wertfunktion bildet einen Zusammenhang zwischen Werten und Eigenschaftsgrößen. Beim Aufstellen solcher Wertfunktionen ergibt sich der gesuchte Wertverlauf entweder aus einem bekannten mathematischen Zusammenhang zwischen Wert und Eigenschaftsgröße oder als geschätzter Verlauf, der häufiger vorliegt (Herrmann 1970). Eine Hilfe für Produktentwickler ist es, hierzu ein Urteilsschema aufzustellen, in dem die verbal oder zahlenmäßig angegebenen Eigenschaftsgrößen für die Bewertungskriterien durch Punktvergabe stufenweise den Wertvorstellungen des Bewertenden zugeordnet werden.

Um die unterschiedliche Bedeutung einzelner Bewertungskriterien für eine Lösung zu berücksichtigen, sehen die meisten Bewertungsverfahren eine Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien vor. Diese Gewichtungsfaktoren  $g_j$  bestimmen somit die Wertigkeit der Bewertungskriterien und ergeben zusammen mit den Bewertungskriterien das zu untersuchende Zielsystem. Durch die Multiplikation von Maßzahl  $m_{ij}$  und Gewichtung  $g_j$  entsteht eine Wertungszahl  $w_{ij}$  für jede Variante  $i$  und jedes Bewertungskriterium  $j$ . Durch eine Summation der Wertungszahlen einer Variante wird die Bewertung einer Lösung ( $Gw_i$ ) erreicht. Somit errechnet sich dann der Gesamtwert einer Variante zu:

$$Gw_i = \sum_{i=1; j=1}^{n;k} g_j \cdot m_{ij}$$

*n Anzahl der zu bewertenden Lösungen; k Anzahl der Kriterien; i Alternative; j Kriterium;  $g_j$  Gewichtungsfaktor (zumeist in %);  $m_{ij}$  Maßzahl*

Nach der Bestimmung der Wertungszahlen können anschließend die Bewertungsergebnisse graphisch (Bedeutungsprofile, Eigenschaftsspinne, usw.) oder numerisch dargestellt werden. Dabei kann entweder anhand des Gesamtwertes ein relativer Vergleich der Varianten untereinander und somit die „beste“ Lösung ermittelt oder eine Abschätzung der Varianten gegen eine gedachte Ideallösung mit einem maximalen Gesamtwert durchgeführt werden.

Im Zusammenhang mit dem generischen Bewertungsablauf sind folgende Empfehlungen, die einen praxisnahen Einsatz der Verfahren erleichtern, festzuhalten:

1. Die Analyse bzw. Informationsbeschaffung muss korrekt und mit vertretbarem Aufwand erfolgen.
2. Spezifikation und Dokumentation der Bewertungskriterien und der eingesetzten Bewertungsmethode dienen der besseren Nachvollziehbarkeit.
3. Haben alle Varianten denselben Wert, kann dieser gelöscht werden.
4. Eine Untergliederung der Kriterienliste nach Teilsystemen ist sinnvoll.
5. Kriterien sollten unabhängig sein bzw. bei der Bewertung der Lösung muss die Abhängigkeit der Kriterien bekannt sein.
6. Es ist empfehlenswert, je Bewertungsrunde die maßgeblichen Kriterien zu kennzeichnen, um den Bewertungsverlauf zu dokumentieren.

Dieses allgemeine Vorgehen findet sich in einer Vielzahl von Bewertungsverfahren wieder, die allerdings je nach Komplexität und Zielsetzung bestimmte Schritte betonen bzw. straffen. Daher sollen im Folgenden die unterschiedlichen Bewertungsverfahren auf Basis der Komplexität und des notwendigen Zeitaufwandes klassifiziert werden. Diese Untergliederung soll einen Hinweis darauf geben, welches Verfahren für die anstehende Bewertungsaufgabe am besten geeignet ist. Da es nicht sinnvoll ist, generell komplexe und zeitaufwändige Verfahren zu verwenden, sollte sich die Komplexität eines Bewertungsverfahrens unmittelbar an der Komplexität der vorliegenden Aufgabenstellung orientieren.

			Kriteriengewichtung										Maßzahlumsetzung		Zahlen	
			Bei Kriteriengruppen		Kriterienbereinigung		Bewertungstafeln		Rangfolgeverfahren		Präferenzmatrix		Dominanzmatrix		inkonsistente EM	
			•	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
<b>C</b>			Argumentenbilanz	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			Bedeutungsprofile	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●
			Paarweiser Vergleich	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
			Punktbewertung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>B</b>			Nutzwertanalyse	●	○	●	○	○	○	●	○	○	●	○	●	●
			Rangfolgeverfahren	○	○	○	○	●	○	○	○	○	●	○	○	○
			Präferenzmatrix	○	○	○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	●
			Techn.-wirts. Bewertung	○	○	○	●	○	○	○	○	●	○	●	○	●
<b>A</b>			Abstandsberechnung nach BAUER	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
			Vorrangsmethode (AHP)	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	●	●
			Verfahren nach BREING	●	●	○	○	○	○	●	○	●	○	●	●	●
			Verfahren nach KNOSALA	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●	○	●	●

**Abb. 6.51** Überblick und Klassifizierung etablierter Bewertungsverfahren (in Anlehnung an Adunka 2002)

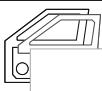
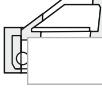
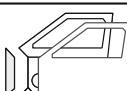
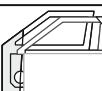
Zusätzlich muss bei der Wahl des Bewertungsverfahrens berücksichtigt werden, wie dringlich eine Entscheidung ist und wie schnell eine Bewertung mit Hilfe des Verfahrens herbeigeführt werden kann. Als Maßstab für die Komplexität als auch für den Zeitaufwand können die Methoden zur Kriteriengruppierung und -bereinigung, Ermittlung der Kriteriengewichtung, der Maßzahlumsetzung sowie der Schärfe bzw. Unschärfe der Zahlen herangezogen werden (s. Abb. 6.51).

Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Bewertungsmethoden der Kategorien C (einfach) und B (umfassend) wird einheitlich am Beispiel der Evaluierung verschiedener PKW-Türrohbaukonzepte erläutert. Das Beispiel findet hierbei Anlehnung an eine Benchmarkstudie von Hilfrich et al. (2007). Im Rahmen der Studie wurden dabei eingesetzte Türen verschiedenster Hersteller beschafft, analysiert und im Sinne einer Bewertung gegenübergestellt. Dadurch liegen belastbare Daten über die Türkonzepte vor, die einer Bewertung zugrundegelegt werden können. Im Folgenden werden jeweils vier konzeptiell und technologisch unterschiedliche Konzepte herangezogen, um die Anwendung der Bewertungsverfahren beispielhaft zu demonstrieren.

Die grundlegenden Schritte sind bei den meisten Bewertungsverfahren ähnlich und orientieren sich am generischen Vorgehen, wie in Kap. 6.4 beschrieben. Im Folgenden wird demnach bei der Vorgehensbeschreibung nur auf Besonderheiten bzw. Abweichungen vom generischen Vorgehen detailliert eingegangen.

#### 6.4.1 Einfache Bewertungsverfahren zur Vorauswahl von Lösungsvarianten

Im Folgenden werden beispielhaft einfache Bewertungsverfahren (Kategorie C) zur Vorauswahl von Lösungsvarianten beschrieben.

Alternative Türkonzepte	Vorteile	Nachteile
Variante A 	- hohe Fensterrahmensteifigkeit - geringe Materialkosten - guter Toleranzausgleich	- geringe Brüstungssteifigkeit - hohe Wartungskosten - hoher Materialeinsatz
Variante B 	- geringer Verschnitt - hohe Crashperformance - hohe dynamische Steifigkeit	- hoher Mitarbeitereinsatz - aufwendige Werkzeuge - viele Fügeschritte
Variante C 	- hohe Betriebsfestigkeit - geringe Türabsenkung - wenig Vorrichtungsaufwand	- kaum Toleranzausgleich - viel Verschnitt - hoher Materialeinsatz
Variante D 	- geringer Anlageninvest - geringe Arbeitskosten - geringer Materialeinsatz	- aufwendige Werkzeuge - lange Prozesskette - aufwendige Einarbeitung

**Abb. 6.52** Argumentenbilanz für verschiedene Türkonzepte (in Anlehnung an Herrmann 1970; Fiedler 2010)

**Argumentenbilanz** Ein sehr einfaches qualitatives Entscheidungsinstrument stellt die Argumentenbilanz dar: Hierbei werden Vor- und Nachteile einzelner Lösungsalternativen tabellarisch aufgelistet und gegenübergestellt (s. Abb. 6.52). Die Stärken und Schwächen der einzelnen Varianten werden nicht näher beschrieben, wobei die Argumente nicht bei allen Lösungsalternativen verwendet werden müssen (Haberfellner 1994).

Vorteil dieser universell einsetzbaren Methode ist ihre einfache Durchführbarkeit, die nur geringen Aufwand nach sich zieht (Wartzack et al. 2000). Die Argumentenbilanz ist auf Grund ihrer fehlenden linguistischen Präzision und der gegenseitigen Gewichtung der Argumente nur für einfache Fragestellungen einsetzbar. Durch diese Methode kann keine eindeutig schlechteste und beste Lösung identifiziert werden. Sie ist geeignet, sich schnell Klarheit über eine Entscheidungsaufgabe zu schaffen oder für Teilspekte zu sensibilisieren. Für Entscheidungen mit hohem Risiko und weitreichenden Konsequenzen sind A- oder B-Methoden zu empfehlen.

**Punktbewertung** Ziel der Methode ist die Ermittlung einer Rangfolge für Lösungsalternativen (Adunka 1999). Von dieser Methode sind zwei Varianten zu unterscheiden, die gewichtete und die ungewichtete Punktbewertung (Ehrlenspiel 2003). Bei der gewichteten Punktbewertung werden die identifizierten Kriterien entsprechend ihrer Bedeutung für den Erfolg des neuen Produktes gewichtet (Lindemann 2007). Das Vorgehen bei einer gewichteten Punktbewertung lässt sich in sechs Schritte gliedern:

### 1. Bewertungskriterien festlegen

Die Bewertungskriterien werden aus Anforderungen abgeleitet, die in der Anforderungsliste aufgeführt sind, wobei diese auf die aktuelle Entscheidungsaufgabe zugeschnitten sein müssen.

## 2. Gewichtung der Bewertungskriterien bestimmen

Die Gewichtung der Kriterien zueinander wird üblicherweise mit Zahlen zwischen 0 und 1 festgelegt, wobei die Summe aller Kriteriengewichte 1 ergeben muss.

## 3. Eigenschaften der Varianten beschreiben

In diesem Schritt werden die qualitativen und quantitativen Eigenschaften der zu bewertenden Varianten in Bezug auf die Kriterien beschrieben.

## 4. Eigenschaften mit Punkten bewerten

Die zuvor festgelegten Eigenschaften der Lösungsalternativen werden nach einer festgelegten Punkteskala (z. B. 1-4) bewertet.

## 5. Punkte mit Gewichtung multiplizieren

Durch die Multiplikation der vergebenen Punkte der Varianten mit den Kriteriengewichten werden die gewichteten Punktzahlen berechnet.

## 6. Aufsummieren der Resultate aus der Multiplikation von Kriteriengewichten mit den Punktzahlen für jede Variante

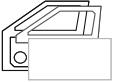
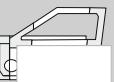
Durch die Summation der Punkte für jede Lösungsalternative entsteht eine Rangfolge der einzelnen Varianten. Die Lösung mit der höchsten Punktzahl ist die am besten bewertete Alternative für die vorliegende Aufgabe.

Bei einer ungewichteten Punktbewertung entfallen die Schritte 2 und 5. Wie aus Abb. 6.53 ersichtlich, ist das Verfahren der ungewichteten Punktbewertung nicht so aussagekräftig wie das Verfahren mit gewichteten Kriterien, mit dem die besseren Lösungen eindeutiger gefunden werden können. Das Verfahren der gewichteten Punktbewertung wird beispielsweise bei der Präferenzmatrix und Nutzwertanalyse zum Bewerten von Produktideen bzw. -konzepten eingesetzt (Adunka 2002).

Vorteil dieses Verfahrens ist seine universell einsetzbare und einfache Nutzung, die innerhalb kurzer Zeit durchführbar ist. Zur erfolgreichen Durchführung der Punktbewertung muss ein ausreichender Kenntnisstand der Eigenschaften einer Lösungsvariante vorhanden sein (Adunka und Wartzack 1999). Die Bewertung sollte in einem Team durchgeführt werden.

**Paarweiser Vergleich** Der paarweise Vergleich ist eine universell einsetzbare und einfach durchzuführende Methode, bei der jeweils zwei Lösungsvarianten paarweise miteinander verglichen werden. Hierzu müssen zunächst die Lösungsalternativen, die verglichen werden sollen, zusammengetragen werden.

Zur übersichtlichen Darstellung werden die Lösungsvarianten in die Spalten und Zeilen einer Matrix eingetragen (s. Abb. 6.54). Bei der paarweisen Gegenüberstellung wird geprüft, welche Lösung als besser eingestuft wird (direkter Vergleich). Bei einem Unentschieden wird das Feld freigelassen. Die Entscheidungen werden oberhalb der Diagonalen

Variante \ Kriterien	Statische Performance	Dynamische Performance	Zusammenbaugüte	Masse	Summe
Gewichtung	0,15	0,15	0,15	0,55	
<b>Variante A</b> 	2	2	3	3	10
	gew. Punkte	0,30	0,30	0,45	1,65
<b>Variante B</b> 	3	3	2	2	10
	gew. Punkte	0,45	0,45	0,30	1,10
<b>Variante C</b> 	4	2	1	0	7
	gew. Punkte	0,60	0,30	0,15	0,00
<b>Variante D</b> 	2	3	2	0	7
	gew. Punkte	0,30	0,45	0,30	0,00

**Abb. 6.53** Punktbewertung für Türkonzepte

Lösungsvarianten	Kriterium Crash-Performanz				→ Anzahl Präferenzen Summe Vergleich
	A	B	C	D	
Variante A		B	C	D	0
Variante B			B	B	2
Variante C				C	1
Variante D					0

Anzahl Präferenzen ↓    0    1    1    1

**Abb. 6.54** Paarweiser Vergleich für Kriterien

in der symmetrischen Matrix festgehalten. Über Abzählen der Einträge z. B. von A in Zeilenrichtung der Spalte A wird eine Punktesumme gebildet, d. h., es wird die Anzahl der Buchstaben des jeweiligen Kriteriums in der entsprechenden Zeile und in der dazugehörigen Spalte ermittelt. Die Zahlen aus Zeilen und Spalten werden lösungsspezifisch addiert und aus den Zahlenwerten eine Rangfolge gebildet. Abbildung 6.54 zeigt den paarweisen Vergleich für das Kriterium Crash-Performanz des Fahrzeug-Türenbenchmarks.

Dieser systematische Bewertungsprozess lässt sich gut im Team bewerkstelligen. Jedoch besteht die Gefahr, dass dominierende Gruppenmitglieder einen starken Einfluss auf andere Mitglieder ausüben. Die Identifikation der zu präferierenden Lösung kann je nach

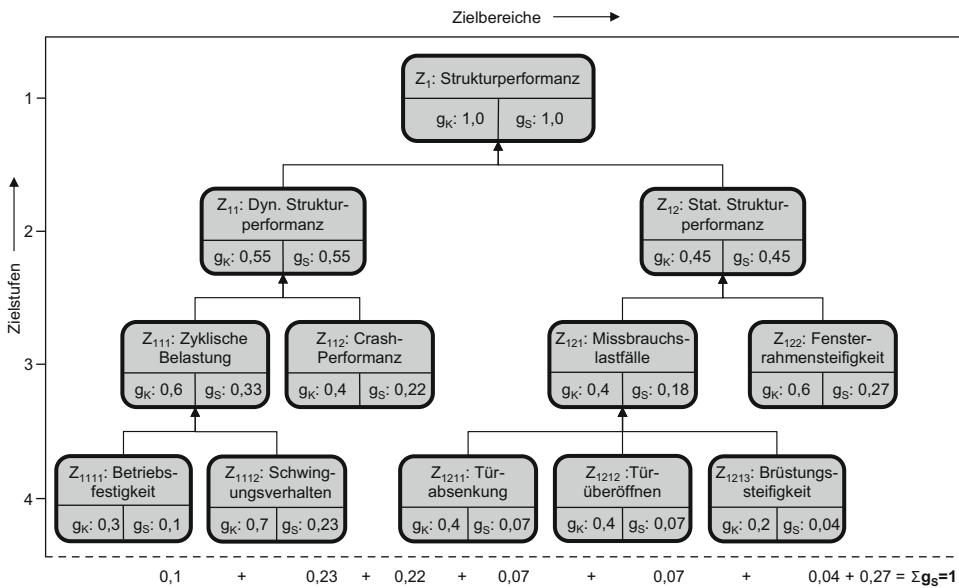
zu bewertender Situation schwierig sein. Deswegen sollte im Bewertungsteam genügend Know-how über den jeweiligen Sachverhalt vorhanden sein. Der Entscheidungsprozess wird dokumentiert und ist somit im Nachhinein transparent nachvollziehbar; insbesondere dann, wenn die Einträge der Matrix  $a_{ij}$  kommentiert abgelegt werden. Wenn eine große Anzahl an Lösungen vorliegt, ist diese Methode allerdings zeitaufwändig und komplex in der Durchführung, da der Aufwand, jede Lösung mit jeder anderen zu vergleichen, quadratisch zunimmt.

### 6.4.2 Aufwändige Bewertungsverfahren zur Lösung von Entscheidungsaufgaben

Zur Bearbeitung komplexerer Problemstellungen, bei denen die o. g. Verfahren schnell an ihre Grenzen stoßen, wurden universelle Bewertungsmethoden entwickelt. Während die einfachen Bewertungsverfahren (C-Verfahren) nur für wenig weitreichende Entscheidungen eingesetzt werden sollen, eignen sich die Verfahren Nutzwertanalyse und technisch-wirtschaftliche Bewertung in Verbindung mit der Präferenzmatrix hervorragend für komplexere Entscheidungsaufgaben.

**Nutzwertanalyse** Die Nutzwertanalyse (NWA) geht auf Zangemeister (1970) zurück und wurde 1970 erstmals vorgestellt. Sie stellt eine Vorgehensweise zur Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen dar. Einsatz findet die Nutzwertanalyse vor allem bei komplexen Produkten mit einer großen Anzahl relevanter Bewertungskriterien. Voraussetzung für den Einsatz ist ein ausreichender Kenntnisstand der Merkmalsausprägungen der zu bewertenden Lösungsalternativen (Lindemann 2007). Die Nutzwertanalyse dient auch der Projektauswahl im Rahmen des strategischen Projektcontrollings, da mit ihr alle wesentlichen Einflussfaktoren auf den Projekterfolg untersucht werden können (Fiedler 2010).

Charakteristisch für die Nutzwertanalyse ist das strukturierte Aufstellen der Bewertungskriterien. Dieser Arbeitsschritt wird systematisiert durch Aufstellen eines Zielsystems, das die einzelnen Ziele als Teilziele  $Z_i$  vertikal in mehrere Zielstufen abnehmender Komplexität und horizontal in unterschiedliche Zielbereiche, z. B. in technische und wirtschaftliche oder in solche unterschiedlicher Bedeutung (Haupt- und Nebenziele), hierarchisch gliedert: Wegen der gewollten Unabhängigkeit sollten Teilziele einer höheren Zielstufe nur mit einem Ziel der nächst niedrigeren Zielstufe verbunden sein. Diese hierarchische Ordnung vereinfacht die Abschätzung der Bedeutung der Teilziele für den Gesamtwert. Als Bewertungskriterien werden die Knoten herangezogen, die nicht weiter unterteilt werden (Blätter des hierarchischen Zielsystem-Baumes, s. Abb. 6.55). Diese werden bei der Nutzwertanalyse auch Zielkriterien genannt. In Abb. 6.55 ist ein möglicher Ausschnitt eines Zielsystems für den Demonstrator PKW-Türe dargestellt. Das Hauptziel „Strukturperformanz“, d. h. das



**Abb. 6.55** Struktur eines Zielsystems inklusive Gewichtung

statische und dynamische Verhalten der Tragstruktur, kann um weitere Ziele auf der obersten Hierarchiestufe ergänzt werden. Soll jede Lösungsvariante mit genau einem Nutzwert beschrieben werden, so ist die höchste Zielstufe nur durch ein Ziel (Hauptziel) zu besetzen. Die Kriterien für die eigentliche Bewertung befinden sich im gezeigten Beispiel auf der dritten sowie der vierten Zielstufe ( $Z_{1111}, Z_{1112}, Z_{112}, Z_{1211}, Z_{1212}, Z_{1213}, Z_{122}$ ).

Die Gewichtung der Bewertungskriterien erfolgt anhand des aufgestellten Zielsystems. Bei der Nutzwertanalyse wird mit Faktoren zwischen 0 und 1 gewichtet. Dabei soll die Summe der Faktoren aller Bewertungskriterien (Teilziele der niedrigsten Komplexitätsstufe) gleich 1 sein, um eine prozentuale Gewichtung der Teilziele untereinander zu erreichen. Die Aufstellung eines Zielsystems erleichtert eine solche Gewichtung. Eine exemplarische Gewichtung ist ebenfalls Abb. 6.55 zu entnehmen. Bei der Nutzwertanalyse wird je Teilziel  $Z_i$  in eine Knotengewichtung  $g_K$  sowie in eine Stufengewichtung  $g_S$  unterschieden. Dabei geben die Knotengewichte  $g_K$  den Bedeutungsgrad hinsichtlich des direkt übergeordneten Teilziels an, wodurch die Knotengewichte zu einem Überziel zugehöriger Unterziele (z. B.  $Z_{111}$  und  $Z_{112}$ ) stets in Summe den Wert 1 ergeben. Die Stufengewichte errechnen sich aus dem Produkt der Ketten an Knotengewichten vom betrachteten Teilziel bis hin zum Hauptziel. Im Beispiel aus Abb. 6.55 ergibt sich das Stufengewicht des Teilziels „Betriebsfestigkeit“  $g_K(Z_{1111})$  aus dem Produkt von  $g_K(Z_{1111})$  selbst und  $g_K(Z_{111}), g_K(Z_{11})$  sowie  $g_K(Z_1)$ . Beim Aufstellen der Gewichtung sind deshalb im ersten Schritt die Knotengewichte zu ermitteln und anschließend die Stufengewichte abzuleiten.

Nach Aufstellen der Bewertungskriterien und Festlegen ihrer Bedeutung werden im nächsten Arbeitsschritt für die zu bewertenden Lösungsvarianten die bekannten bzw. durch

**Tab. 6.2** Auszug einer Nutzwertmatrix

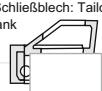
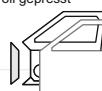
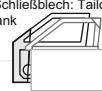
Bewertungskriterium			Eigenschaftsgrößen		Variante V1			...	Vn
ID	Benennung	Gew.	Benennung	Einheit	Eigen-schaftsgröße	Maßzahl	Wertungs-zahl		
Z <sub>1111</sub>	Betriebsfestigkeit	0,1	Ertragbare Lastspiele	–	900.000	9	0,9		
Z <sub>1112</sub>	Schwingungsverhalten	0,23	Erste Eigenfrequenz	Hz	88	8	1,84		
...									
Z <sub>n</sub>		g <sub>Kn</sub>			<sup>e</sup> <sub>1n</sub>	m <sub>1n</sub>	W <sub>1n</sub>	Nutzwert	
								$G_{w1} = \sum w_{1i}$	

Analyse ermittelten Eigenschaftsgrößen den jeweiligen Bewertungskriterien zugeordnet. Die Eigenschaftsgrößen können zahlenmäßige Kennwerte sein oder – wo dies nicht möglich ist – verbale, möglichst konkrete Aussagen. Anschließend wird durch Vergeben von Wertungszahlen  $m_i$  für die jeweiligen Bewertungskriterien  $Z_i$  die eigentliche Bewertung durchgeführt. Die Wertungszahlen erstrecken sich im Rahmen der Nutzwertanalyse von 0 bis 10, wobei 0 für eine unbrauchbare Funktionserfüllung und 10 für eine ideale Lösung steht. In diesem Zusammenhang ist es hilfreich, im Vorfeld ein Urteilsschema aufzustellen, in dem die verbal oder zahlenmäßig angegebenen Eigenschaftsgrößen für die Bewertungskriterien durch Punktvergabe stufenweise den Wertvorstellungen zugeordnet werden. Den Nutzwert  $G_{wi}$  (Gesamtwert) der jeweiligen Lösungen erhält man durch Multiplizieren der Maßzahlen mit der jeweiligen Gewichtung und anschließende Summation über alle Bewertungskriterien. Der Bewertungsverlauf wird übersichtlich in der Nutzwertmatrix dargestellt (vgl. Tab. 6.2).

Die Stärke der Nutzwertanalyse liegt in der systematischen Strukturierung der Bewertungskriterien, welche die stufenweise Ableitung der Gewichtung ermöglicht. Dieses Gewichtungsverfahren erlaubt in der Regel eine realitätsgerechte Einstufung, da es leichter ist, zwei oder drei Teilziele gegenüber einem höher geordneten Ziel abzuwägen, als alle Kriterien gleichzeitig gegeneinander abzuwägen.

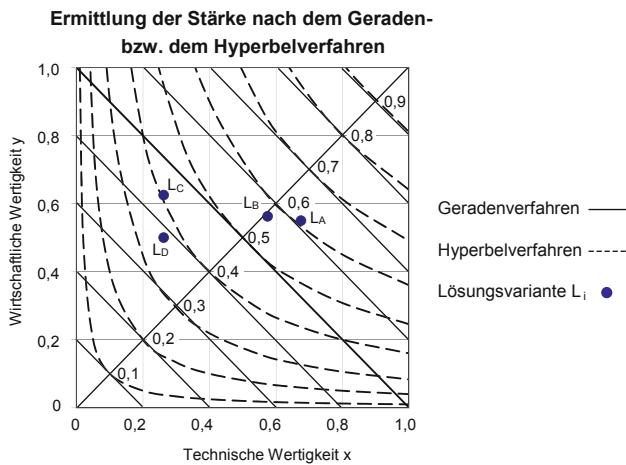
**Technisch-wirtschaftliche Bewertung** Das Verfahren der technisch-wirtschaftlichen Bewertung geht maßgeblich auf Kesselring (1951) zurück und wird in der VDI Richtlinie 2225 detailliert beschrieben. Die technisch-wirtschaftliche Bewertung wird vornehmlich am Ende der Konzeptphase zur Eingrenzung des Lösungsraums verwendet (N.N. 1977).

Zu Beginn der technisch-wirtschaftlichen Bewertung sind anhand der Anforderungsliste die Bewertungskriterien abzuleiten, wobei eine gezielte Aufteilung in technische sowie wirtschaftliche Aspekte erfolgt. Im Gegensatz zur Nutzwertanalyse bildet die VDI Richtlinie 2225 keine hierarchische Ordnung der Bewertungskriterien. Es wird versucht, in erster Linie

Beschreibungen der Kriterien → (Treiber)	Materialkosten • Materialgrundkosten • Verschnitt • Materialminimierung	Fertigung Einzelteile • Werkzeuge • Einarbeitungen • Arbeitskosten/Einheit • Werkzeugverschleiß • Wartungskosten	Fertigung Zusammenbau • Spannvorrichtungen • Dauer der Fügeschritte/Einheit	Investitionskosten • Anlageninvest gering • Mitarbeitereinsatz	Wertungszahl $w_i = \sum (r_{ij} * g_j)$	wirtschaftliche Wertigkeit $y = (w_i / \sum w_i) * 100$
Maßzahlumsetzung für $m_i \rightarrow$	{ 0, 1, 2, 3, 4 }	{ 0, 1, 2, 3, 4 }	{ 0, 1, 2, 3, 4 }	{ 0, 1, 2, 3, 4 }		
Gewichtungen $g_i \rightarrow$	25	30	25	20		
Variante		Soll-Wert $\Sigma g_i := 100$				
Variante A: - Schießblechkonzept 	Materialgrundkosten: + Verschnitt: - Materialminimierung: --	Werkzeuge: + Einarbeitungen: + Arbeitskosten: - Werkzeugverschleiß: - Wartungskosten: -	Spannvorrichtungen: + Dauer der Fügeschritte/Einheit: +	Anlageninvest: o Mitarbeitereinsatz: +		
	1	2	3	3	220	0.55
Variante B: - Mehrteiliger Rahmen - Schießblech: Tailored blank 	Materialgrundkosten o Verschnitt ++ Materialminimierung ++	Werkzeuge: -- Einarbeitungen: - Arbeitskosten: + Werkzeugverschleiß: + Wartungskosten: ++	Spannvorrichtungen: o Dauer der Fügeschritte/Einheit: -	Anlageninvest: o Mitarbeitereinsatz: -		
	3	2	2	2	225	0.56
Variante C: - Voll gepresst 	Materialgrundkosten + Verschnitt -- Materialminimierung -	Werkzeuge: ++ Einarbeitungen: + Arbeitskosten: o Werkzeugverschleiß: o Wartungskosten: +	Spannvorrichtungen: + Dauer der Fügeschritte/Einheit: +	Anlageninvest: + Mitarbeitereinsatz: +		
	1	3	3	3	250	0.63
Variante D: - Mehrteiliger Rahmen - Schießblech: Tailored blank 	Materialgrundkosten: o Verschnitt: + Materialminimierung: ++	Werkzeuge: -- Einarbeitungen: - Arbeitskosten: + Werkzeugverschleiß: + Wartungskosten: +	Spannvorrichtungen: - Dauer der Fügeschritte/Einheit: -	Anlageninvest: + Mitarbeitereinsatz: -		
	3	2	1	2	200	0.50
ideal	4	4	4	4	400	1.00

**Abb. 6.56** Wirtschaftliche Bewertung anhand des Beispiels Tür-Rohbau

ohne Gewichtung auszukommen, indem annähernd gleichbedeutende Bewertungskriterien aufgestellt werden. Den Einfluss von Gewichtungsfaktoren auf den Gesamtwert einer Lösung haben Kesselring (1951), Lowka (1975), und Stahl (1976) näher untersucht. Sie kamen zum Ergebnis, dass dann ein merklicher Einfluss besteht, wenn die zu bewertenden Varianten stark unterschiedliche Eigenschaften und die betreffenden Bewertungskriterien hohe Bedeutung haben. In vielen praktischen Anwendungen erweist sich die Vergabe von Gewichtungsfaktoren jedoch als zweckmäßig. Der eigentliche Bewertungsvorgang erfolgt analog dem generischen Vorgehen durch Vergabe von Maßzahlen für die jeweiligen Bewertungskriterien. Im Rahmen der technisch-wirtschaftlichen Bewertung wird eine Punkteskala von 0 bis 4 vorgeschlagen, wobei 0 unbefriedigende bzw. 4 eine ideale Erfüllung des Bewertungskriteriums darstellt. Das Vorgehen der Maßzahlverteilung kann weiter systematisiert werden, indem jedes Bewertungskriterium durch sog. Treiber beschrieben wird. Darunter werden diejenigen Indikatoren verstanden, die in Summe ein Bewertungskriterium beschreiben (s. Abb. 6.56). Bei der Maßzahlvergabe sind sequenziell die Treiber der einzelnen Kriterien zu bewerten und auf Basis der Teilergebnisse die entsprechende Maßzahl für das jeweilige Kriterium zu vergeben. Ein Beispiel für eine mögliche Lösung der wirtschaftlichen Bewertung des Beispiels Rohbau einer Fahrzeugtür ist Abb. 6.56 zu entnehmen.



**Abb. 6.57** Auswertungsdiagramm zur Ermittlung der Stärke

Über Aufsummieren der vergebenen Maßzahlen für die verschiedenen Bewertungskriterien ergeben sich abschließend die Wertungszahlen der Varianten für die wirtschaftliche Betrachtung. Die explizite wirtschaftliche Wertigkeit  $y$  ergibt sich durch Normieren der Wertungszahlen, wobei die maximal erreichbare Punktzahl dem Wert 1 entspricht. Die in Abb. 6.56 dargestellte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist in gleicher Weise auch für die technische Wertigkeit  $x$  durchzuführen. Um die zu bewertenden Lösungsvarianten gegenüberzustellen, ist abschließend aus technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit eine Gesamtwertigkeit – die sog. Stärke  $S$  – zu ermitteln. Hierzu werden die zu vergleichenden Konstruktionen abhängig von ihren Werten für technische Wertigkeit  $x$  und wirtschaftliche Wertigkeit  $y$  in ein Auswertungsdiagramm eingetragen. Die Verteilung der Stärke innerhalb des Auswertungsdiagramms lässt sich nach Baatz (1971) über die zwei Verfahren Geraden- und Hyperbelverfahren bestimmen. Abbildung 6.57 zeigt beide Verfahren im Vergleich.

- Geradenverfahren: arithmetisches Mittel aus technischer Wertigkeit  $x$  und wirtschaftlicher Wertigkeit  $y$ :

$$S = \frac{x + y}{2}$$

- Hyperbelverfahren: geometrisches Mittel aus technischer Wertigkeit  $x$  und wirtschaftlicher Wertigkeit  $y$ :

$$S = \sqrt{x \cdot y}$$

Das Geradenverfahren kann bei großen Unterschieden zwischen technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit eine höhere Gesamtwertigkeit errechnen als bei niedrigeren, aber ausgewogenen Einzelwertigkeiten. Da aber in der Regel ausgeglichenen Lösungen der

Vorzug gegeben werden soll, ist das Hyperbelverfahren geeigneter, da es große Wertigkeitsunterschiede durch seinen progressiv wirkenden Reduzierungscharakter ausgleicht. Je größer die Unequalität, umso größer ist der Reduzierungseffekt auf den Gesamtwert.

Die technisch-wirtschaftliche Analyse stellt eine Methode dar, welche den Entwickler beim gezielten Auffinden technischer sowie wirtschaftlicher Schwachstellen unterstützt. Als Nachteil ist, wie bei der Nutzwertanalyse, ebenfalls der erhöhte Durchführungsaufwand zu nennen.

**Rangfolgeverfahren und Präferenzmatrix** Beim Rangfolgeverfahren (Gutsch 1972; Wenzel und Müller 1971) sowie bei der Bewertung mittels Präferenzmatrix handelt es sich um sehr ähnliche Verfahren, welche bevorzugt bei der Evaluierung einfacher Systeme eingesetzt werden (Adunka 2002). Sie entsprechen dem paarweisen Vergleich (s. Abschn. 6.4.1), können aber insbesondere herangezogen werden, um eine Gewichtung der Kriterien herbeizuführen. Sie eignen sich daher insbesondere im Kontext der Verfahren aus Kategorie B.

Hierzu werden die aus der Anforderungsliste abgeleiteten Bewertungskriterien in einer Matrix gesammelt. Über den paarweisen Vergleich (s. Abschn. 6.4.1) der Bewertungskriterien wird geprüft, ob ein Kriterium wichtiger („+“), gleich wichtig („0“) oder weniger wichtig („-“) ist, und dies in der Matrix festgehalten. Über Abzählen der „+“-Zeichen wird eine Rangfolge der Bewertungskriterien aufgestellt, welche als Anhaltspunkt für die Gewichtungsfaktoren dienen. Abbildung 6.58 zeigt die Präferenzmatrix für Bewertungskriterien zur Evaluierung der Strukturperformanz des Fahrzeugtürenbenchmarks. Basierend auf der ermittelten Rangfolge wird so die Gewichtung der Bewertungskriterien abgeleitet.

Der wesentliche Unterschied zwischen den Verfahren Präferenzmatrix und Rangfolgeverfahren liegt darin, dass im Rahmen der Bewertung mittels Präferenzmatrix beim paarweisen Vergleichen die Möglichkeit „gleich wichtiger Kriterien“ explizit ausgeschlossen wird (Siemens 1974). Somit ergibt sich eine geringere Anzahl an möglichen Gewichtungskonstellationen.

### 6.4.3 Komplexe Bewertungsverfahren zur Entscheidungsfindung

**Gewichtete Bewertung mittels scharfen, unscharfen und frei abgeschätzten Bewertungsgrößen nach Breiing und Knosala** Zwei engverwandte, komplexe Bewertungsverfahren stellen die „anforderungsorientierte gewichtete Bewertung mittels scharfer Zahlen“ nach Breiing sowie die „objektivierte gewichtete Bewertung mittels unscharfer Zahlen und Mengen“ nach Knosala dar. Breiing betrachtet in seinem Vorgehen nur scharfe Zahlen für die Maßzahlaussetzung und Gewichtung und generiert somit absolut konsistente Entscheidungsmatrizen. Daher ist dieses Bewertungsverfahren sowohl für einfache als auch komplexe Konstruktionen zu empfehlen. Knosala hingegen berücksichtigt zusätzlich die

**Abb. 6.58** Gewichtung nach dem Rangfolgeverfahren

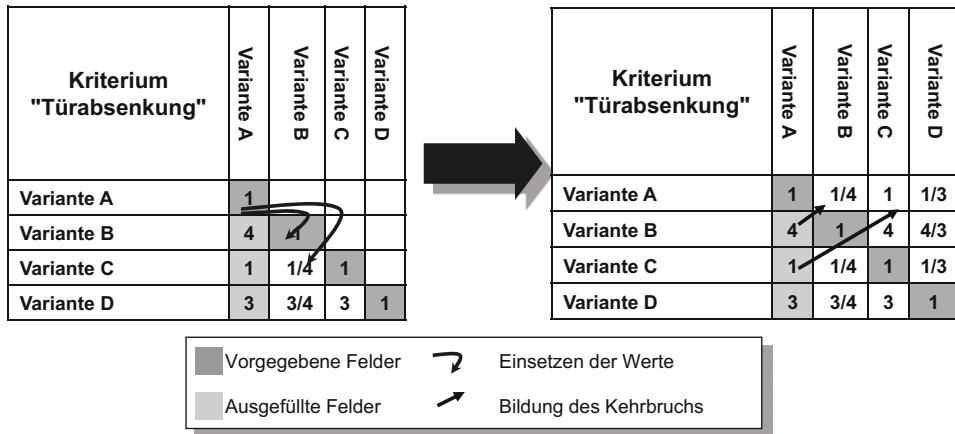
Bewertungskriterien								Rangfolge der Kriterien
	K1: Betriebsfestigkeit	K2: Schwingungsverhalten	K3: Crashperformanz	K4: Last: Türabsenkung	K5: Last: Türüberöffnen	K6: Brüstungssteifigkeit	K7: Fensterrahmensteifigkeit	
K1: Betriebsfestigkeit	-	-	-	+	+	+	-	3 4
K2: Schwingungsverhalten	+	+	+	+	+	+	-	5 2
K3: Crashperformanz	+	-	+	+	+	+	-	4 3
K4: Last: Türabsenkung	-	-	-	0	+	-	1	5
K5: Last: Türüberöffnen	-	-	-	0	+	+	-	1 5
K6: Brüstungssteifigkeit	-	-	-	-	-	-	-	0 6
K7: Fensterrahmensteifigkeit	+	+	+	+	+	+	-	6 1
Anzahl der "-" (Probe)	3	5	4	1	1	0	6	

Streuung der Einschätzungen der Bewerter und erzeugt dadurch inkonsistente Entscheidungsmatrizen, deren Formulierung mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden und somit nur für komplexe Konstruktionen zu empfehlen ist (Breiling und Knosala 1997).

Nach der Aufstellung der Bewertergruppe sowie der Ableitung, Bereinigung und Gruppierung der Bewertungskriterien aus expliziten und impliziten Anforderungen werden die Werte dieser Kriterien bestimmt und eingetragen. Auf Basis dieser Werte wird anschließend die Rangfolge der Lösungen bestimmt (s. Abb. 6.59). Die Maßzahlumsetzung erfolgt nun auf Basis der Rangfolge sowie der vorher definierten Wertfunktionen oder eines paarweisen Vergleiches. Bei der Ermittlung der Gewichtungsfaktoren werden die jeweiligen Kriterien in die jeweils erste Zeile und Spalte der Tafelmatrix eingetragen. Daraufhin wird die Wichtigkeit eines Kriteriums gegenüber den anderen eingetragen und anschließend die Wichtigkeiten der übrigen Kriterien analog Abb. 6.59 berechnet.

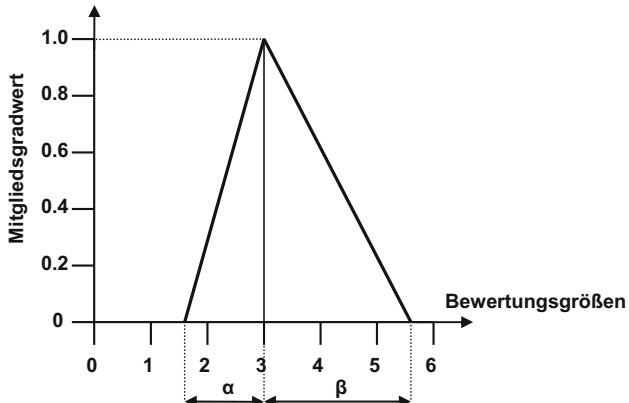
Anschließend werden die Gewichtungen pro Kriteriengruppe berechnet, normiert und zusammen mit den Maßzahlen in die Bewertungstabellen der jeweiligen Kriteriengruppe übertragen. In einem weiteren Schritt werden Gruppenwertigkeiten ebenfalls in einer konsistenten Entscheidungsmatrix ermittelt. Dabei schlägt Breiling eine Untergliederung der Gewichtungsfaktoren in technische, wirtschaftliche und psychologische Kriterien vor. Diese werden mit den Bewertungsergebnissen zu einer Gesamtbewertung verrechnet. Eine Normierung der Gesamtwertigkeit wird vor der abschließenden Darstellung der Bewertungsergebnisse empfohlen.

Um die Meinung der beteiligten Bewerter zu berücksichtigen, fordert Knosala frei abgeschätzte Entscheidungsmatrizen sowohl für die Maßzahlermittlung als auch für die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren (Zadeh 1975).



**Abb. 6.59** Vorgehen bei der Berechnung einer konsistenten Entscheidungsmatrix (Adunka 2002)

**Abb. 6.60** Unscharfe Erfassung des Erfüllungsgrades anhand triangulärer Zugehörigkeitsfunktion (Adunka 2002)



Dabei beschreibt er zunächst ein äquivalentes Vorgehen zu Breiling, berechnet jedoch bei den Maßzahlen der Kriterien als auch bei den Gewichtungsfaktoren jeweils den Minimal-, Mittel- und Maximalwert. Somit entsteht eine trianguläre Zugehörigkeitsfunktion in Form eines Dreiecks, dessen Spreizung ( $\alpha + \beta$ ) die Streuung und dessen Spitze den Mittelwert der Meinungen der Bewerter widerspiegelt, s. Abb. 6.60. Daher entspricht ein Dreieck mit einer geringen Spreizung einem sehr sicheren Meinungsbild, während die horizontale Lage der Spitze des Dreiecks (Mittelwert) ein Maß für die Erfüllung einer Variante bzw. die Wichtigkeit eines Kriteriums beschreibt.

Zusätzlich kann der Erfüllungsgrad einer Lösung durch eine unscharfe Menge oder eine Verteilung beschrieben werden. Dabei wird für jedes Kriterium der Erfüllungsgrad zweier Varianten verglichen und durch eine Menge beschrieben. Erfüllt beispielsweise die Variante A nach Meinung eines Bewerters ein Kriterium mehr als die Variante B, so ordnet er dieser die Menge  $r_x$  zu. Ist ein anderer Bewerter der Meinung, dass die Variante A das Kriterium

**Abb. 6.61** Mengentheoretische Erfassung des Erfüllungsgrades (Adunka 2002; Zadeh 1975; Bothe 1995)

Mengentheoretische Erfassung des Erfüllungsgrades $r_x[0,1]$	
Sehr viel weniger	$1 - r_x^4$
Viel weniger	$1 - r_x^2$
Weniger	$1 - r_x$
Gleich	$1 - 2r_x [0 < r_x < 0,5]$ $2r_x [0,5 < r_x < 1]$
Mehr	$r_x$
Viel mehr	$r_x^2$
Sehr viel mehr	$r_x^4$

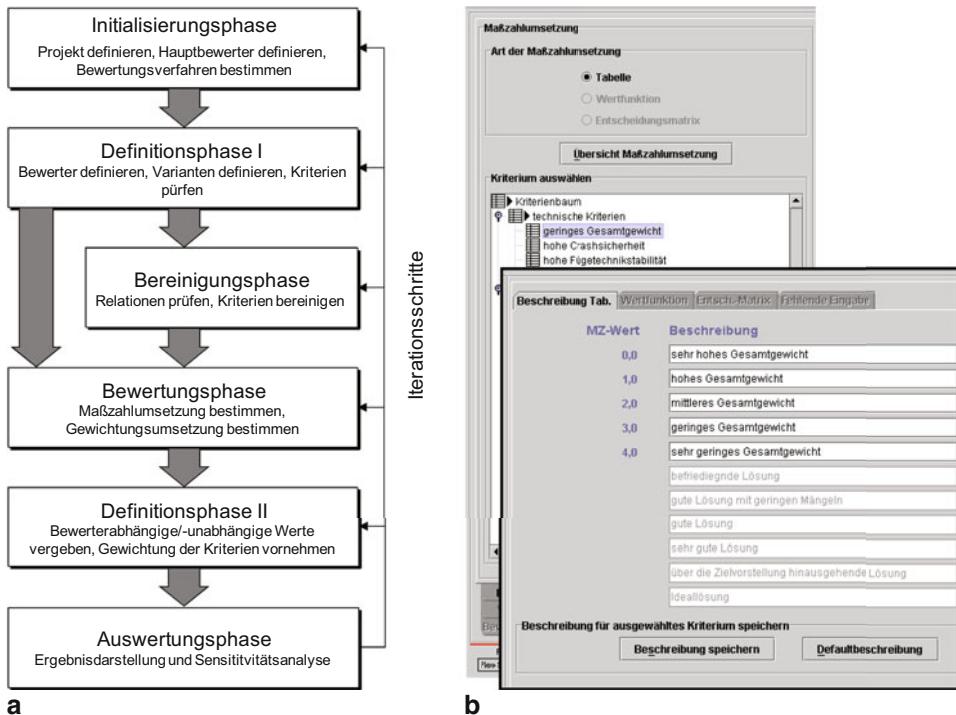
weniger erfüllt als eine Variante B, so ordnet er dieser beispielsweise die Menge  $1 - r_x$  zu. (Eine Übersicht dieser mengentheoretischen Erfassung des Erfüllungsgrades ist in Abb. 6.61 dargestellt.)

Durch mengentheoretische Operationen wird anschließend eine Überlagerung der Einschätzungen (Mengen) der einzelnen Bewerter erreicht und so der Erfüllungsgrad als unscharfe Menge modelliert und die Maßzahlen ermittelt. Falls Werte scharf erfasst werden können, werden sie dennoch als unscharfe Zahl mit einer Streuung von Null betrachtet, wodurch nach Adunka eine Überhöhung der Objektivität erreicht wird (Adunka 2002). Die nachfolgenden Schritte erfolgen wieder analog zu dem Vorgehen nach Breiling und Knosala (1997).

#### 6.4.4 Rechnerunterstützung

Im methodischen Entwicklungsprozess ist der Entwickler mit einer Vielzahl von Entscheidungsaufgaben, deren Komplexität infolge eines gestiegenen Individualisierungsbedarfs zunimmt, konfrontiert. Dabei besteht das Bedürfnis, die Ergebnisse transparent zu dokumentieren und die erstellten Daten wieder zu verwenden, um sie in späteren Phasen erneut zu bewerten und so detailliertere Resultate zu erhalten. Die Rechnerunterstützung leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, den Bewertungsprozess strukturiert und effektiv zu gestalten, konsistente Bewertungsergebnisse zu erzeugen und die Informationen in weiterverarbeitbarer Form bereitzustellen.

Die oben gezeigten Verfahren können sehr einfach über Tabellenkalkulationsprogramme abgebildet werden. Ebenso ist in verschiedenen kommerziellen Tools eine Umsetzung der Vorgehensweisen erfolgt. Auf eine Darstellung der Vielzahl verfügbarer Werkzeuge wird



**Abb. 6.62** a) Phasenorientiertes Workflowkonzept des Softwarewerkzeugs nach Adunka (2002) und b) Bedienoberfläche am Beispiel der Maßzahlumsetzung für eine technisch-wirtschaftliche Bewertung (Stockinger 2007; Stockinger und Wittmann 2007)

hier verzichtet. Stellvertretend für die rechnerunterstützte Bewertung technischer Systeme werden hier zwei Applikationen vorgestellt: das Konzept des Software-Werkzeugs „Evaluator“ (Adunka 2002) und das Werkzeug Balance3D (Bauer 2010).

**Evaluator** Intention des Bewertungsframeworks „Evaluator“ ist es, das nach Breining und Knosala (1997) entwickelte allgemeine Vorgehen, das modular auf methodische Komponenten von Bewertungsverfahren zurückgreift, in eine Software umzusetzen. Der Einsatz modularer Bewertungsprozessbausteine erlaubt es dabei – zugeschnitten auf den Anwendungsfall – rechnergestützt Bewertungen durchzuführen. Wesentliche Merkmale der Software sind die Workflow-Gebundenheit, die verfahrensübergreifende Implementierung, ein Berechnungskern für die Ergebnisberechnung aller unterstützter Verfahren, Funktionen zur Sensitivitätsanalyse und die automatische Reportfunktion.

Die Workflow-Gebundenheit des Systems orientiert sich dabei an einem generischen Phasenkonzept, das die Schritte Initialisierungsphase, Definitionsphase, Bereinigungsphase (optional), Definitionsphase II und Auswertungsphase unterstützt (s. Abb. 6.62). Der Bewerter wird dabei aktiv durch den Bewertungsprozess geleitet, womit ein strukturiertes Vorgehen begünstigt wird.

Wird dabei von einer Phase in eine vorherige zurückgesprungen, so werden die Daten nachfolgender, bereits durchgeführter Prozessschritte verworfen. Dies ist zur Sicherstellung eines konsistenten, verfälschungsfreien Bewertungsresultats wichtig. Weiterhin liegt der Software ein Rollenkonzept zu Grunde: Während der Hauptbewerter das Projekt anlegen, das Bewertungsverfahren, die zur Auswahl stehenden Varianten sowie die Kriterien und zugehörige Maßzahlumsetzung bestimmen kann, können ab dem Start der eigentlichen Bewertung – auch in Form der verteilten Bewertung – mehrere Bewerter die Evaluierung der Aufgabenstellung vornehmen. Abschließend kann nach optionaler Durchführung einer Sensitivitätsanalyse ein Bericht generiert werden, der organisatorische (Projektdaten, Teilnehmer, ...) und inhaltliche (Kriterien, Maßzahlumsetzungen, ...) Informationen enthält. Wichtig festzuhalten ist, dass im Berechnungskern die verfahrensabhängigen Rechenvorschriften enthalten sind, die damit zu verlässlichen Ergebnissen führen und gleichzeitig für die Sensitivitätsanalyse herangezogen werden.

**Balance3D** Zumeist deckt eine ganzheitlich und detailliert bearbeitete Bewertungsaufgabe Zielkonflikte auf. Am Beispiel der Fahrzeugtüren lässt sich etwa erkennen, dass die Leichtbaukenngrößen Masse, Kosten und Qualität ein Spannungsfeld bilden: Die Masse kann oftmals nur zu Lasten der Kosten reduziert werden. An dieser Stelle setzt das Verfahren Balance3D an. Es bietet Produktentwicklern eine umfassende Unterstützung für Entscheidungsaufgaben mit deutlichen Abhängigkeiten zwischen den Entscheidungsvariablen (Produktanforderungen). Im Fokus stehen dabei die frühen Entwicklungsphasen, insbesondere die Aufgaben der strategischen Analyse incl. Gewichtung von Anforderungen sowie die Bewertung und Auswahl von Produktkonzepten. Eine ausführliche Beschreibung von Balance3D incl. eines Praxisbeispiels ist in Bauer (2010) zu finden.

Zentraler Ansatz von Balance3D ist es dabei, komplexe Entscheidungsaufgaben mit abhängigen Entscheidungsvariablen durch eine intuitive, rechnergestützte Visualisierung transparent darzustellen. Diese Darstellung erlaubt dem Anwender zudem, interaktiv und visuell zwischen den dargestellten abhängigen Entscheidungsvariablen strategisch abzuwagen und somit auf einfache Art und Weise unter korrekter Berücksichtigung der Abhängigkeiten Gewichtungsfaktoren festzulegen.

Balance3D unterscheidet grundlegend zwischen Produkteigenschaften und Produktmerkmalen. Merkmale kann der Entwickler dabei beeinflussen, sind also somit Festlegungen hinsichtlich Geometrie und Werkstoff, während hingegen Eigenschaften aus der Merkmals-Festlegung resultieren und somit nicht direkt beeinflusst werden können. Eine Produktanforderung wird in diesem Sinne als erwünschte Produkteigenschaft (wie z. B. die Steifigkeit) verstanden und entspricht damit einem Bewertungskriterium. In der Praxis besteht nun zwischen einem Paar erwünschter Produkteigenschaften E1 und E2 sehr häufig eine Abhängigkeit. Konkurrenz (Komplementarität) zwischen E1 und E2 entsteht dabei genau dann, wenn die zum Erreichen von E1 notwendige Ausprägung eines Merkmals gleichzeitig dem Erreichen von E2 abträglich (zuträglich) ist.

Für die angestrebte Visualisierung der Abhängigkeiten erwünschter Eigenschaften zueinander und zu den zugrunde liegenden Produktmerkmalen nimmt Balance3D Anleihen

aus dem strukturentdeckenden Verfahren „Multidimensionale Skalierung“ (beschrieben beispielsweise in Backhaus et al. (2000)).

Als Eingangsdaten sind paarweise Bewertungen erwünschter Produkteigenschaften hinsichtlich ihrer Abhängigkeiten erforderlich. Diese können direkt vom Nutzer durchgeführt oder durch Balance3D auf Basis einer qualitativen Bewertung der Auswirkungen von Merkmalsausprägungen auf das Erreichen oder Nichterreichen erwünschter Produkteigenschaften generiert werden.

Der Algorithmus des strukturentdeckenden Verfahrens (beschrieben in Bauer 2010) stellt nun die erwünschten Eigenschaften als Punkte in einem dreidimensionalen Raum dar, mit der Folge, dass die repräsentierenden Punkte komplementärer (konkurrenzender) Eigenschaften eine geringe (große) Distanz zueinander aufweisen. Die zugrunde liegenden Produktmerkmale können als Dimensionen in diesem Raum identifiziert werden.

Die große Stärke dieser Darstellung liegt darin, dass komplexe Entscheidungsaufgaben mit einer Vielzahl abhängiger Entscheidungsvariablen transparent und intuitiv verständlich gemacht werden. Das Abwägen zwischen den einzelnen erwünschten Eigenschaften, also das Gewichten, erfolgt interaktiv durch die Festlegung eines Punktes (Strategiepunkt) in der Visualisierung. Dieser ist vom Entscheider derart zu wählen, dass die repräsentierenden Punkte eher wichtiger (eher unwichtiger) Eigenschaften eine geringe (große) Distanz zum Strategiepunkt ihm aufweisen. Balance3D ist schließlich in der Lage, mittels einer in Bauer (2010) dargestellten Logik aus der Positionierung des Strategiepunktes korrespondierende Gewichtungsfaktoren der erwünschten Produkteigenschaften abzuleiten. Das Verfahren stellt damit ein Hilfsmittel bei der Bewertung dar, welches das Finden einer konsistenten Kriteriengewichtung erlaubt.

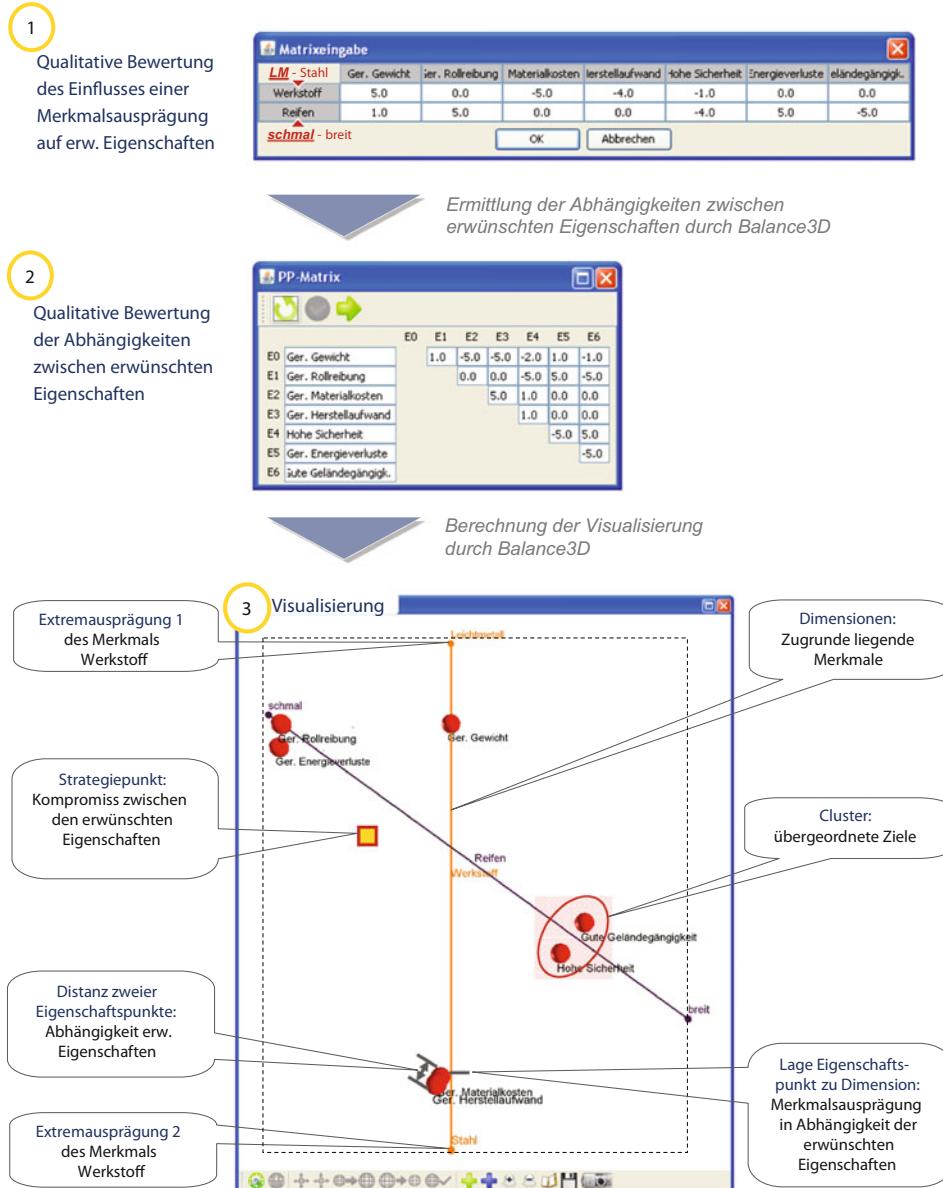
Die Vorgehensweise mit Balance3D und die Aussagekraft des Ergebnisses ist anhand eines einfachen Beispiels (Fahrrad) in Abb. 6.63 gezeigt.

#### 6.4.5 Überprüfung der Bewertungsergebnisse

Bei der Anwendung von Bewertungsverfahren kann es zu einer Vielzahl an Fehlern kommen, deren Auswirkungen sich in Art, Schwere und Umfang stark unterscheiden können. Daher ist das Ergebnis einer jeden Bewertung im Anschluss kritisch zu prüfen und Möglichkeiten zu suchen, wie der Bewertungsprozess verbessert werden kann. Hierzu ist die Bewertung vor allem bezüglich Objektivität, Plausibilität und Sensitivität zu hinterfragen:

**Objektivität:** Bei jeder Durchführung einer Bewertung ist darauf zu achten, dass subjektive Einflüsse auf den Ausgang der Bewertung minimiert werden. Dies kann durch Berücksichtigung einiger Aspekte unterstützt werden, welche im Folgenden aufgezählt werden.

So ist die Bewertung eines jeden Kriteriums mit gleichen Maßstäben für die Erreichung eines objektiven Ergebnisses unerlässlich. Um Voreingenommenheit zu vermeiden, ist eine neutrale Bezeichnung und Beschreibung der Bewertungsgegenstände förderlich. Zudem hilft dies, eine Beeinflussung durch starke Emotionen zu vermeiden. Eine Bewertung in Gruppen verhindert eine Überbewertung des eigenen Lösungsvorschlags und vermeidet



**Abb. 6.63** Aufbereitung einer Entscheidungsaufgabe mit Balance3D am Beispiel eines Fahrrades (Bauer 2010)

so zusätzlich Verzerrungen innerhalb der Teilbewertungen. Soweit möglich sollten zur Bewertung nur quantifizierbare Indikatoren herangezogen werden. Um dabei die gebotene Objektivität sicherzustellen, sind Messfehler bei solchen quantitativen Bewertungskriterien soweit wie möglich auszuschließen. Sind die gewählten Indikatoren gar nicht oder

zumindest nicht mit hinreichender Genauigkeit messbar, ist zu prüfen, ob eine qualitative Bewertung ausreicht. Hier kann eine Verwendung von verbalen Schätzangaben in der Form „hoch“, „mittel“, „tief“ hilfreich sein. Kommen dennoch und trotz Berücksichtigung der bisher genannten Aspekte Zweifel an der Objektivität einer Bewertung auf, so sind besonders aus Kundenanforderungen übersetzte Bewertungskriterien auf fehlerhafte Annahmen bei deren Ableitung hin zu überprüfen.

*Plausibilität:* Nach der Durchführung der Bewertung ist das Ergebnis stets auf Plausibilität zu überprüfen. Zudem ist eine Analyse hinsichtlich der erreichbaren Aussagesicherheit durchzuführen. Die Plausibilität der Bewertung kann u. U. durch die Beachtung folgender Gesichtspunkte sichergestellt bzw. erhöht werden:

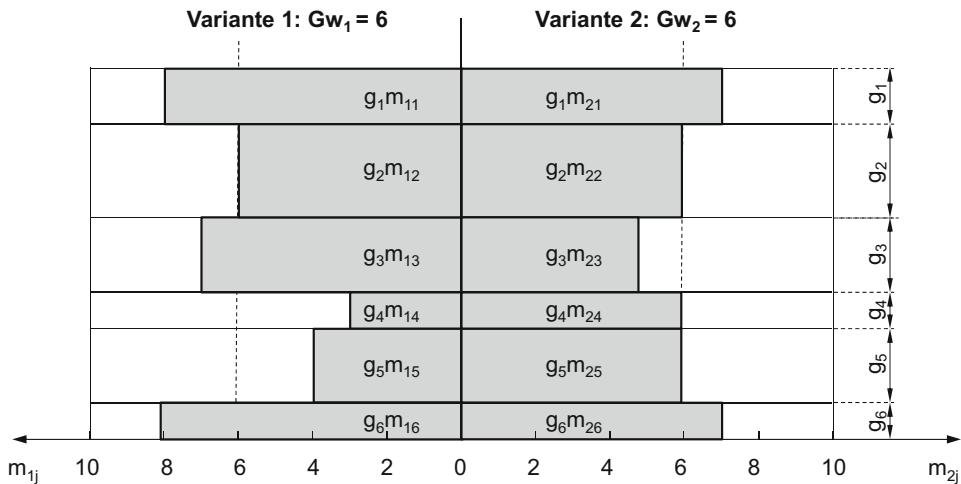
Um eine plausible Bewertung zu erreichen, muss sichergestellt sein, dass alle relevanten Kriterien berücksichtigt worden sind. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die Bewertung unter Berücksichtigung verschiedener Blickwinkel vorgenommen und eine Entscheidung nicht einseitig getroffen wird.

Häufig kann eine Bewertung nur auf Basis unsicherer Eingangsdaten durchgeführt werden. Vor allem in frühen Phasen der Produktentwicklung existiert nicht genug oder nicht hinreichend abgesichertes Wissen über das Produkt. Daher ist darauf zu achten, dass Bewertungen möglichst robust gegenüber solchen Unsicherheiten in den Eingangsinformationen gestaltet werden, indem z. B. vergleichende Bewertungen zur Vorbereitung einer späteren Lösungsauswahl vorgenommen werden. Insgesamt ist bei unplausiblen Bewertungsergebnissen zu beachten, dass eine Bewertung zu festen Zeitpunkten nur Momentaufnahmen erlaubt und keine gesicherte Aussage zum Verlauf eines Indikators gibt.

*Sensitivität:* Sensitivitätsanalysen sind bei komplexen, schwer überschaubaren Zusammenhängen zwischen den Bewertungskriterien anzuwenden. Ihr Ziel ist es, zu ermitteln, wie sensitiv das Bewertungsergebnis auf Variation der Randbedingungen (z. B. Gewichtung, Maßzahl, usw.) reagiert.

Im Falle von unerwarteten/unplausiblen Bewertungsergebnissen sind gezielt diejenigen Randbedingungen zu untersuchen, welche im Rahmen des Bewertungsvorgangs zu Unstimmigkeiten führen. Eine Möglichkeit hierzu stellt die Ermittlung der jeweiligen Sensitivität der Kriterien dar. Dadurch kann ein detaillierter Überblick über den Einfluss und die Auswirkungen bestimmter Indikatoren gewonnen werden. Zudem kann es helfen, eine Abschätzung der Streuung der Werte vorzunehmen. Eine genauere Analyse der Bewertung hinsichtlich der erreichbaren Aussagesicherheit sowie einen Vergleich der Verfahren führen Feldmann und Stabe durch (Feldmann 1974; Stabe und Gerhard 1974).

*Schwachstellenanalyse:* Ein wichtiges Hilfsmittel, um die Plausibilität und Sensitivität von Bewertungsergebnissen zu untersuchen, ist eine Schwachstellenanalyse. Schwachstellen werden durch unterdurchschnittliche Werte bezüglich einzelner Bewertungskriterien erkennbar. Sie sind besonders bei günstigen Varianten mit guten Gesamtwerten sorgfältig zu beachten und möglichst bei der Weiterentwicklung des Produktes zu beseitigen. Zum Erkennen von Schwachstellen bei den Lösungsvarianten können graphische Darstellungen der Teilwerte herangezogen werden. Man benutzt hier sog. Wertprofile gemäß Abb. 6.64. Während die Balkenlängen der Werthöhe  $m_{ij}$  entsprechen, sind die Balkendicken ein Maß



**Abb. 6.64** Werteprofil zum Vergleich von Varianten

für die Gewichtung  $g_i$ . Die Flächeninhalte der Balken geben die gewichteten Teilwerte und die graue Fläche den Gesamtwert einer Lösungsvariante an. Es ist einsichtig, dass es für die Verbesserung einer Lösung vor allem wichtig ist, denjenigen Teilwert zu verbessern, der einen größeren Beitrag zum Gesamtwert liefert. Das trifft bei vorliegender Darstellung für solche Bewertungskriterien zu, die eine große Balkendicke (große Bedeutung) besitzen. Neben einem hohen Gesamtwert ist es darüber hinaus wichtig, ein ausgeglichenes Wertprofil zu erreichen, bei dem keine gravierenden Schwachstellen auftreten. So ist in Abb. 6.64 Variante 2 günstiger als Variante 1, obwohl beide denselben Gesamtwert aufweisen. Die Kriterien  $g_4$  und  $g_5$  bei Variante 1 schneiden stark unterdurchschnittlich ab und können somit als Schwachstellen angesehen werden.

Das Wesen eines Bewertungsvorgangs ist auf der Grundlage einer generischen Vorgehensweise dargestellt worden. Insbesondere wird die Auswahl der Methoden durch die eingeführte Kategorisierung in A-, B- und C-Bewertungsverfahren erleichtert. Dadurch wird eine dem Umfang der Bewertungsaufgabe angepasste Anwendung der Methoden ermöglicht. Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass für einen effektiven Einsatz der vorgestellten Methoden der Anwender über ausreichend Erfahrung verfügen sollte.

## Literatur

### Abschnitt 6.1

Abell DF (1978) Strategic windows. J Mark 42(3):21 (July)

Altschuller GS (1998) Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme, Limitierter Nachdruck der 2. Aufl. In: Möhrle M Cottbus (Hrsg) PI – Planung und Innovation

- Beitz W (1996) Customer Integration im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess. Konstruktion 48:31–34
- Bengisu Ö (1970) Elektrohydraulische Analogie. Ölhydraulik und Pneumatik 14:122–127
- Brankamp K (1974) Produktplanung – Instrument der Zukunftssicherung im Unternehmen. Konstruktion 26:319–321
- Brezing AN (2005) Planung innovativer Produkte unter Nutzung von Design- und Ingenieurdiestleistungen. Shaker, Diss. RWTH Aachen
- Bürdek B (2005) Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung. Birkhäuser, Basel
- Bürgel HD, Haller C, Binder M (1996) F & E-Management. Vahlen, München
- Dalkey ND, Helmer O (1963) An experimental application of the delphi method to the use of experts. Manage Sci 9(3):458–467 (April)
- Dreibholz D (1975) Ordnungsschemata bei der Suche von Lösungen. Konstruktion 27:233–240
- Eder WE (1995) Methode QFD – Bindeglied zwischen Produktplanung und Konstruktion. Konstruktion 47:1–9
- Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U (1998) Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin
- Eversheim W (2003) Innovationsmanagement für technische Produkte. Springer, Berlin
- Feldhusen J, Gebhardt B, Macke N, Nurcahya E, Bungert F (2006) Development of a set of methods to support the implementation of a PDMS. In: Brissaud D, Tichkiewitch S, Zwolinski P (Hrsg) Innovation in life cycle engineering and sustainable development. Springer, Netherlands, S 381–397
- Gausemeier J (Hrsg) (1995) Die Szenario-Technik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd 7. Heinz-Nixdorf Institut, Paderborn
- Gausemeier J, Fink A, Schlake O (1995) Szenario-Management, Planen und Führen mit Szenarien. Hanser, München
- Gausemeier J, Ebbesmeyer P, Kallmeyer F (2001) Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Hanser, München
- Gemünden HG et al (2003) Erfolgsorientierte Steuerungen von Innovationsprojekten. Präsentation der Untersuchungsergebnisse des Innovations-Kompass. [http://www.tim.tu-berlin.de/forschung/innokompass/-download/sose03\\_innokompass\\_steuering.pdf](http://www.tim.tu-berlin.de/forschung/innokompass/-download/sose03_innokompass_steuering.pdf). Zugegriffen: 05. Juni 2005
- Geschka H (1991) Produktplanung in Großunternehmen. Proceedings ICED 91, Schriftenreihe WDK 20. HEURISTA, Zürich
- Geyer E (1972) Marktgerechte Produktplanung und Produktentwicklung. Teil 1: Produkt und Markt, Teil 11: Produkt und Betrieb. RKW-Schriftenreihe Nr 18 und 26. Gehlsen, Heidelberg (mit zahlreichen weiteren Literaturstellen)
- Glauner C, Korte S (2003) Ingenieur-Dienstleistungen. Forschungsbericht zum Vorhaben „Ingenieurmäßige Dienstleistungen: Systematisierung und Innovationsförderung durch Standardisierung“ (Förderkennzeichen 01HG0036) der Abteilung Zukünftige Technologien Consulting des VDI-Technologiezentrums. Düsseldorf
- Gordon WJJ (1961) Synectics, the development of creative capacity. Harper, New York
- Hauschildt J (2004) Innovationsmanagement. Franz Vahlen, München
- Hellfritz H (1978) Innovation via Galeriemethode. Eigenverlag, Königstein/Ts
- Herb R, Herb T, Kohnhauser V (2000) TRIZ–der systematische Weg zur Innovation. Werkzeuge; Praxisbeispiele, Schritt-für-Schritt-Anleitungen. Verlag Moderne Industrie, Landsberg
- Heufler G (1987) Produkt – Design: Von der Idee zur Serienreife. Veritas, Linz
- Hoffmann J (1997) Entwicklung eines QFD-gestützten Verfahrens zur Produktplanung und -entwicklung für kleine und mittlere Unternehmen. Diss. Universität Stuttgart
- Klein B (2002) TRIZ/TIPS–Methodik des erforderlichen Problemlösens. Oldenbourg, München

- Kleinaltenkamp M, Fließ S, Jacob F (Hrsg) (1996) Customer Integration – Von der Kundenorientierung zur Kundenintegration. Gabler, Wiesbaden
- Kleinaltenkamp M, Plinke W (Hrsg) (2000) Technischer Vertrieb – Grundlagen, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Koller R (1998a) Konstruktionslehre für den Maschinenbau, 4. Aufl. Springer, Berlin
- Kotler P, Bliemel F (1999) Marketing Management: Analyse, Planung, Umsetzung und Steuerung, 9. Aufl. Schäffer-Poeschl, Stuttgart
- Kramer F (1986) Innovative Produktpolitik, Strategie – Planung – Entwicklung – Einführung. Springer, Berlin
- Kramer F, Kramer M (1997) Bausteine der Unternehmensführung – Kundenzufriedenheit und Unternehmenserfolg, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Lesmeister F (2001) Verbesserte Produktplanung durch den problemorientierten Einsatz präventiver Qualitätsmanagementmethoden. Diss. RWTH Aachen
- Lubkowitz D (1997) Markt und Trendforschung im Design Management. In: Buck A, Vogt M (Hrsg) Design Management. Gabler, Wiesbaden
- Mai C (1998) Effiziente Produktplanung mit Quality Function Deployment. Diss. Universität Stuttgart
- North K (2005) Wissensorientierte Unternehmensführung – Wertschöpfung durch Wissen, 4. Aufl. Gabler, Wiesbaden
- Orloff MA (2002) Grundlagen der klassischen TRIZ: ein praktisches Lehrbuch des erfinderischen Denkens für Ingenieure. Springer, Berlin
- Osborn AF (1957) Applied imagination – principles and procedures of creative thinking. Scribner, New York
- Pahl G, Beelich KH (1981) Lagebericht. Erfahrungen mit dem methodischen Konstruieren. Werkstatt und Betrieb 114:773–782
- Pfeiffer W, Metze G, Schneider W, Amler R (1991) Technologie-Portfolio: zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder, 6. Aufl. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen
- Probst G, Raub S, Romhardt K (2005) Wissen managen – wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen, 5. Aufl. Gabler, Wiesbaden
- Rodenacker WG (1991) Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher, Bd 27. Springer, Berlin (1970, 2. Aufl. 1976, 3. Aufl. 1984, 4. Aufl.)
- Rohrbach B (1969) Kreativ nach Regeln – Methode 635, eine neue Technik zum Lösen von Problemen. Absatzwirtschaft 12:73–75
- Roth K (1996) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3. Aufl. Bd III. Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung. Springer, Berlin
- Roth K (2000) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3. Aufl., Bd I. Konstruktionslehre. Springer, Berlin
- Roth K (2001) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, 3. Aufl., Bd II. Konstruktionskataloge. Springer, Berlin
- Schlösser WMJ, Olderaan WFTC (1961) Eine Analogontheorie der Antriebe mit rotierender Bewertung. Ölhydraulik und Pneumatik 5:413–418
- Seidel M (2005) Methodische Produktplanung – Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess. Diss. Universität Karlsruhe (TH)
- Spath D, Grabowski H et al (Hrsg) (2001) Abschlussbericht des Verbundprojekts „Vom Markt zum Produkt“. Karlsruhe
- Specht G, Beckmann C, Amelingmeyer J (2002) F & E-Management – Kompetenz im Innovationsmanagement, 2. Aufl. Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Steffen D (2000) Design als Produktsprache. Verlag form Theorie, Frankfurt

- VDI-Richtlinie 2220 (1980) Produktplanung, Ablauf, Begriffe und Organisation. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Withing C (1958) Creative thinking. Reinhold, New York
- Wolfrum B (1994) Strategisches Technologiemanagement, 2. Aufl. Gabler Verlag, Wiesbaden
- Zwicky F (1966–1971) Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weltbild. Droemer-Knaur, München

## Abschnitt 6.2

- Ehrlenspiel K (1995) Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkt erstellung und Konstruktion. Hanser, München
- Ernst H (2005) Neuproduktentwicklungsmanagement. In: Albers S, Gassmann O (Hrsg) Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement: Strategie – Umsetzung – Controlling. Gabler, Wiesbaden, S 247–264
- Hood K, Wiebel R (2005) Optimieren von Requirements Management & Engineering: mit dem HOOD Capability Model. Springer, Berlin
- Kickermann H (1995) Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozess. Dissertation TU Braunschweig
- Kramer F, Kramer M (1997) Bausteine der Unternehmensführung, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Nagarajah A (2011) Selbstorganisierende Merkmalskarten für eine anforderungsbasierte Produktvarianteauswahl. Shaker, Aachen
- Pohl K (2008) Requirement Engineering: Grundlagen, Prinzipien, Techniken. dpunkt.verlag, Heidelberg
- Roth K (2000) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Bd 1: Konstruktionslehre. Springer, Berlin
- Roth K, Birkhofer H, Ersoy M (1975) Methodisches Konstruieren neuer Sicherheitsschlösser. VDI-Z 117:613–618
- Schroda F (2000) Über das Ende wird am Anfang entschieden: Zur Analyse der Anforderungen von Konstruktionsaufträgen. Dissertation TU Dresden
- Verband der Automobilindustrie (2006) Automotive VDA-Standardvorlage Komponentenlastenheft (Gelbdruck). Heinrich Druck + Medien, Frankfurt

## Abschnitt 6.3

- Ehrlenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe Methodeneinsatz Zusammenarbeit, 4., überarb. Aufl. Hanser, München
- Koller R (1998) Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte-, und Apparatebau. Springer, Berlin
- Nachtigall W (2003) Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Nagarajah A, Feldhusen J (2009) Produktentwicklung optimieren mit Hilfe der selbst organisierenden Merkmalskarten (SOM) in der Automobilzulieferindustrie. In: Brökel K, Feldhusen J, Grote K-H, Rieg F, Stelzer R (Hrsg) 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Vernetzte Produktentwicklung: Methoden und Werkzeugkopplung, Universität, Bayreuth, S 48–54
- Otto K, Wood K (2001) Product design: techniques in reverse engineering and new product development. Prentice-Hall, Engelwood Cliffs
- Roth K (2001) Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Bd I–II. Springer, Heidelberg

- Sous C (2011) Optimierung oder Neukonstruktion eines Auslaufdiffusors auf Basis eines methodischen Konstruktionsprozesses. Bachelorarbeit bei der KSB Aktiengesellschaft, betreut durch den Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt) der RWTH Aachen. Aachen.
- Übersee Museum Bremen (2012) Übersee Museum Bremen: Abbildung eines Schweinswals. Bremen 2012.
- VAI (1993) Value analysis, value engineering and value management. VAI, Clifton Parkl6 NY
- Zhang WJ, Lin Y, Sinha N (2005) A note on function-behaviour-structure framework for design. Journal of Design Research. The 2. Canadian Design Engineering Network (CDEN) International conference on design education, innovation and practice. July 18–20, Alberta Canada, Kananaskis

## Abschnitt 6.4

- Adunka R (2002) Rechnerunterstützter Bewertungsprozess im Umfeld methodischer Produktentwicklung. Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Düsseldorf VDI-Verlag
- Adunka R, Wartzack S (1999) EVALUATOR – Computerunterstützung für die multikriterielle, verteilte Bewertung technischer Systeme. In: Meerkamm H (Hrsg) Beiträge zum 10. Symposium Fertigungsgerechtes Konstruieren. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen, S 19–26
- Baatz U (1971) Bildschirmunterstütztes Konstruieren. Dissertation. RWTH Aachen
- Bachmann R (2007) Integratives Anforderungsmanagement, Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung. Dissertation, Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe, Universität Karlsruhe
- Backhaus K et al (2000) Multivariate Analysemethoden. Springer-Verlag, Berlin
- Bauer S (2010) Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X. Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr 406. VDI, Düsseldorf
- Bothe HH (1995) Fuzzy Logic – Einführung in Theorie und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin
- Breiling A, Flemming M (1993) Theorie und Methoden des Konstruierens. Springer-Verlag, Berlin
- Breiling A, Knosala R (1997) Bewerten technischer Systeme. Springer-Verlag
- Ehrlenspiel K (2003) Integrierte Produktentwicklung. Hanser, München
- Feldmann K (1974) Beitrag zur Konstruktionsoptimierung von automatischen Drehmaschinen. Diss. TU Berlin
- Fiedler R (2010) Controlling von Projekten – Mit konkreten Beispielen aus der Unternehmenspraxis, 5. Aufl. Vieweg + Teubner
- Gutsch R (1972) Entscheidungshilfen durch Systemtechnik, Lehrgang der Technischen Akademie Esslingen
- Haberfellner R et al (1994) System Engineering: Methodik und Praxis. Zürich
- Herrmann J (1970) Beitrag zur optimalen Arbeitsraumgestaltung an numerisch gesteuerten Drehmaschinen. Diss. TU Berlin
- Hilfrich E, Maas J, Flöth T (2007) Vergleich und Optimierung von Fahrzeugtüren. Autotechnische Zeitung, S 522/529 (06.2007)
- Kesselring F (1951) Bewertung von Konstruktionen, ein Mittel zur Steuerung von Konstruktionsarbeit. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Knosala R (1989) Methoden zur Bewertung von Bauelementen als Voraussetzung für die Entwicklung von Baukastensystemen, Teil 1 und 2, Dissertation, Institut für Mechanik und Grundlagen der Maschinenkonstruktion, TU Gliwice

- Lindemann U (2007) Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin
- Lowka D (1975) Methoden zur Entscheidungsfindung im Konstruktionsprozess. *Feinwerktechnik und Messtechnik* 83:19–21
- Maletz M (2008) Integrated Requirements Modeling. Dissertation, Department of Mechanical and Process Engineering of the University of Kaiserslautern
- Mertens H (1998) Aussagegüte und Zeitaufwand – Kriterien zur Auswahl von Berechnungsmethoden im Konstruktionsprozess, VDI Berichte 1442: Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. VDI, Düsseldorf
- N. N. (1977) VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. VDI-Verlag, Düsseldorf
- N. N. (2003) VDI-Richtlinie 2211 Blatt 2 Entwurf: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Berechnungen in der Konstruktion, 2003–03
- N. N. (2005) DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005); Dreisprachige Fassung EN ISO 9000:2005 Ausgabedatum 2005-12-00
- Sen P (2001) Communicating preferences in multiple-criteria decision making: the role of the designer. *J Eng Des* 12(1):15–24, Taylor & Francis
- Sen P, Yang J-B (1998) Multiple criteria decision support. In: *Engineering design*. Springer, Berlin
- Siemens AG (1974) Organisationsplanung – Planung durch Kooperation. Siemens AG, Berlin
- Stabe H, Gerhard E (1974) Anregungen zur Bewertung technischer Konstruktionen. *Feinwerktechnik und Messtechnik* 82:378–383 (einschließlich weiterer Literaturhinweise)
- Stahl U (1976) Überlegungen zum Einfluss der Gewichtung bei der Bewertung von Alternativen. *Konstruktion* 28:273–274
- Stockinger A (2007) Neuartige Synthese- und Analysemethoden im Entwicklungsprozess flächiger Leichtbauteile. In: Meerkamm H (Hrsg) *Design for X – Beiträge zum 18. Symposium*. Neukirchen, (11/12 Oktober 2007)
- Stockinger A, Wittmann S (2007) Optimieren der Prozesskette durch Auswählen der bestgeeigneten Baustruktur und fertigungsgerechte Gestaltung der Bauteile. SFB 396 – „Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile“, Berichtsband zum Abschlusskolloquium, S 3–46, Erlangen
- Wartzack S, Adunka R, Meerkamm H (2000) Computer aided multi-criteria evaluation of construction structure variants. Third International Symposium on Tools and Methods for Competitive Engineering – TMCE 2000. Niederlande, Delft, S 465–476
- Wartzack S (2001) Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte. Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Wenzel R, Müller J (1971) Entscheidungsfindung in Theorie und Praxis. VDI-Seminar, Stuttgart
- Zadeh LA (1975) Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. Academic Press, New York
- Zangemeister C (1970) Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Diss. Technische Universität Berlin

---

# Hilfsmittel für die Entwicklung und Konstruktion

7

Gamal Lashin, Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Das Umfeld, in dem heute Technologie erzeugt und damit Produkte entwickelt, konstruiert und produziert werden, hat sich in der letzten Dekade stark gewandelt, s. Abb. 7.1.

Damit hat sich auch der Tätigkeitsschwerpunkt dort verändert. Eine lückenlose Dokumentation des Produkts und all seiner Komponenten sowie der zugehörigen Prozesse ist heute von großer Bedeutung. Die Hauptgründe sind zum einen die Produkthaftung eines Unternehmens und zum anderen die erforderliche eineindeutige Kommunikation mit externen Partnern der Entwicklung, Konstruktion und Fertigung, wie sie durch die Globalisierung erforderlich ist (Eigner und Stelzer 2009). Standen bis vor ca. 10 Jahren noch CAD-Systeme zur Definition der Produktgeometrie im Fokus, so gilt dies heute für Systeme zur Produktdaten- und Prozessverwaltung. Diese PDM-Systeme, Product-Data-Management-Systeme, bilden heute das Rückgrat der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen, da sie eine Datenintegration über alle Prozessschritte ermöglichen (Eigner und Stelzer 2009), vgl. Abschn. 3.2. Grundsätzlich werden Hilfsmittel zum

---

G. Lashin (✉)

Vaillant Group, Berghauser Straße 63, 42859 Remscheid, Deutschland

E-Mail: [gamal.lashin@vaillant.de](mailto:gamal.lashin@vaillant.de)

J. Feldhusen

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland

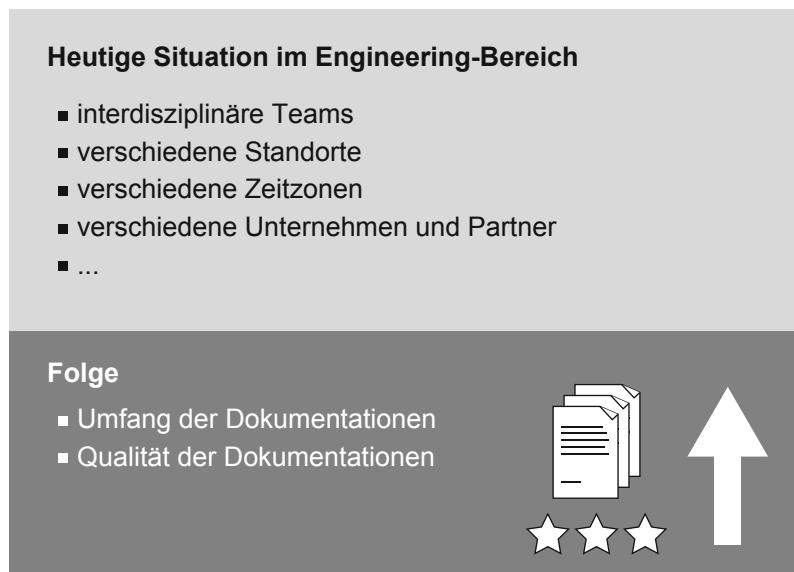
E-Mail: [feldhusen@ikt.rwth-aachen.de](mailto:feldhusen@ikt.rwth-aachen.de)

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland

E-Mail: [karl.grote@ovgu.de](mailto:karl.grote@ovgu.de)



**Abb. 7.1** Heutige Situation im Engineering-Bereich

- Abbilden von Informationen wie Texte, Diagramme, Zeichnungen usw.,
- Erzeugen und Verarbeiten von Daten und Informationen, wie sie sich bei der Berechnung und Zeichnungserstellung ergeben sowie zum
- Verwalten der Daten und Informationen

benötigt.

## 7.1 Konventionelle Hilfsmittel (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Obwohl heute überwiegend rechnerunterstützte Hilfsmittel eingesetzt werden, sind insbesondere in den frühen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses auch konventionelle Hilfsmittel sinnvoll und effektiv einsetzbar. In diesen Phasen des ersten Abschätzens und Ermittelns von Aussagen grundsätzlicherer Art, wie erster Bauraumfestlegungen und weiterer Abmessungen, ist es durchaus von Vorteil, wenn die erzeugten Dokumente einen gewissen vorläufigen Charakter haben. Die Bereitschaft einer kritischen Prüfung und ein evtl. Verwerfen fällt den Anwendern erfahrungsgemäß dann leichter (Lemburg 2009). Ein weiterer Vorteil soll noch erwähnt werden: Wird beispielsweise eine erste und vereinfachte Festigkeitsberechnung eines Bauteils „von Hand“ durchgeführt, so ist es wesentlich einfacher sich die Einflussparameter zu verdeutlichen. Diese Einflussparameter werden möglicherweise bei der Nutzung insbesondere einfacher rechnerunterstützter Berechnungsprogrammen übersehen. Es wird sozusagen „nur in eine Richtung“ gedacht.

Wichtig ist, diese Unterlagen, sobald sie einen Abschluss gefunden haben, ebenfalls als Dokumente zu sichern. In der Praxis bedeutet dies, dass sie in die Entwicklungs- und Konstruktionsakte, versehen mit Datum und Unterschrift, integriert und anschließend gepflegt werden.

---

## 7.2 Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung und -konstruktion (Gamal Lashin)

### 7.2.1 Grundlagen der Rechnerunterstützung

#### 7.2.1.1 Geräteausstattung (Soft- und Hardware)

Die dargelegte Konstruktionslehre ist grundsätzlich auch ohne Rechnereinsatz anwendbar. Sie ist darüber hinaus Grundlage für eine Rechnerunterstützung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses, die über die getrennte Bearbeitung von Berechnungsaufgaben oder das Anfertigen von Zeichnungen hinausgeht, d. h. den Rechnereinsatz in den Arbeitsablauf mehr oder weniger kontinuierlich integriert. Der Einsatz der Datenverarbeitung und Informationstechnik in der Konstruktion dient einer Produktverbesserung sowie der Senkung des Konstruktions- und Fertigungsaufwandes gegenüber manuell geführten Prozessen.

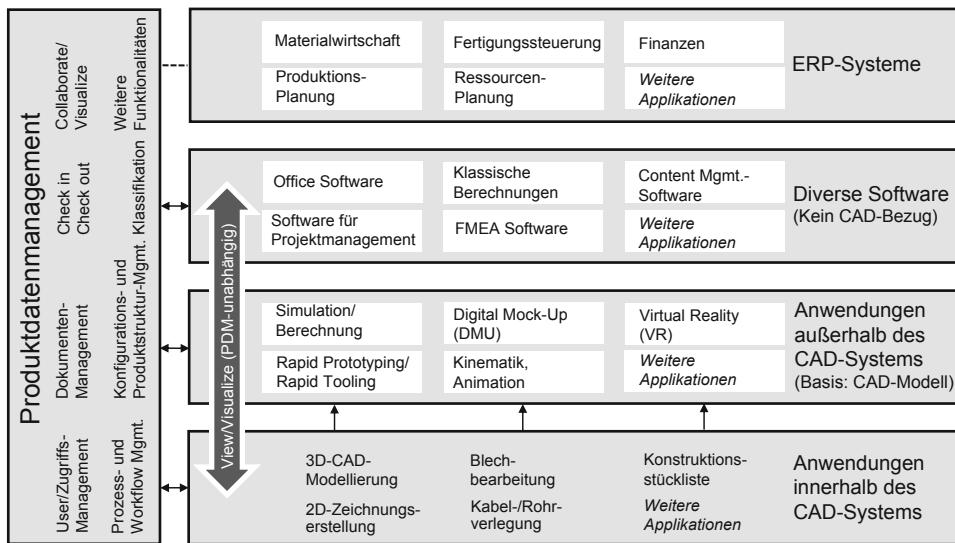
Es existiert eine Vielzahl von Einzelprogrammen und Anwendungssystemen mit unterschiedlichen Schwerpunkten, deren Potenziale durch die ständige Weiterentwicklung von Hard- und Software kontinuierlich verbessert werden.

Die Möglichkeiten der Rechnerunterstützung werden durch die Geräteausstattung (Hardware), das Betriebssystem (Betriebssoftware) und die Programme (Anwendungssoftware) bestimmt. Die Konfiguration des rechnerunterstützten Arbeitsplatzes in der Konstruktionsabteilung hängt von der jeweiligen Aufgabe des Mitarbeiters ab. Ein Projektleiter benötigt in der Regel einen Desktop-Rechner oder einen Laptop, der keine großen Ansprüche an die Hardware-Ausstattung hat, um mit einem Projektmanagementsystem zu arbeiten. Im Gegensatz benötigt ein 3D-CAD-Konstrukteur (CAD: Computer-Aided Design) eine leistungsstarke Hardware, um die Applikation entsprechend effizient zu nutzen.

Die Gestaltung eines CAD-Arbeitsplatzes wird an dieser Stelle nur gestreift, weil erstens die Entwicklung auf dem Hard- und Softwaremarkt zu schnell verläuft, um länger gültige Aussagen zu treffen. Zweitens ist die Angebotspalette zu groß, um an dieser Stelle einen Überblick zu geben. Drittens muss immer eine Abstimmung zwischen der eingesetzten Hardware, dem Betriebssystem und dem verwendeten CAD-System erfolgen.

Die Geräteausstattung besteht grundsätzlich aus einer Zentraleinheit (dem eigentlichen Rechner) und den Peripherieeinheiten (Ein- und Ausgabe- sowie Speichereinheiten). Als Zentraleinheit werden heute vorzugsweise dezentrale Arbeitsplatzrechner (Workstation, Desktops und Laptops) in vernetzter Umgebung eingesetzt. Die Eingabe von Daten und Befehlen erfolgt über Tastatur und Maus, die Ausgabe über einen Bildschirm, einen Plotter oder einen Drucker.

Von den verschiedenen Speichergeräten (Festplatte, Magnetband, CD-ROM, DVD usw.) können Daten ins Anwendungsprogramm eingelesen werden. Diese Speichermedi-



**Abb. 7.2** Anwendungssysteme für die Entwicklung und Konstruktion

en werden auch zur Speicherung der produzierten Daten eingesetzt. Informationsquellen in Papierform können mit gewisser Einschränkung über einen Scanner eingelesen werden. Durch die Vernetzung der Arbeitsplätze in der Konstruktion entstehen weitere Möglichkeiten zur Datenspeicherung und -sicherung.

Der Betrieb eines Rechners ist nur über das Betriebssystem (die Basissoftware) möglich. Das Betriebssystem ist der Vermittler zwischen Hardware, Nutzer und Anwendungssoftware. Bekannte, heute eingesetzte Betriebssysteme sind z. B. Windows, UNIX, LINUX usw.

### 7.2.1.2 Kategorien der Rechnerunterstützung

Wie bereits erwähnt, leistet heute die Informationstechnik einen bedeutenden Beitrag zur Unterstützung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses. Diese Rechnerunterstützung kann in die folgenden Kategorien aufgeteilt werden (s. Abb. 7.2):

**Kategorie 1: CAD-Systeme (3D- und 2D-CAD-Anwendungen)** Computer-Aided Design (CAD) steht für die rechnerunterstützte Entwicklung und Konstruktion im Maschinenbau und in anderen Branchen. CAD-Systeme bieten Funktionalitäten zum Aufbau und Ändern von geometrischen, technologischen Produktmodellen bzw. Zeichnen geometrischer Gebilde und Strukturen für die Mechanik und Elektronik. Es werden die verschiedensten 2D- und 3D-Systeme (parametrisch und nichtparametrisch) angeboten und eingesetzt. CAD-Systeme sind im Allgemeinen aus verschiedenen Modulen aufgebaut. Dazu gehört ein Grundbaustein, der für verschiedene Anwendungsfälle (z. B. Modell- und Zeichnungs-erstellung) erweitert werden kann. Zahlreiche Hersteller bieten zusätzliche Module, z. B. zur Rohr-/Kabelverlegung und zur Blechbearbeitung in einem Gesamtpaket. Für Industrial Design sind leistungsfähige Funktionalitäten zur Modellierung der äußeren Form

verfügbar. Auf den Umfang der CAD-Funktionalitäten und die Auswahl eines für den Anwendungsfall geeigneten CAD-Systems und der weiteren Hard- und Software wird in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen.

**Kategorie 2: CAD-abhängige Applikationssysteme** Bei diesen Anwendungsprogrammen spielt das 3D-CAD-Modell eine zentrale Rolle. Dazu gehören u. a. Systeme zur realitätsnahen Visualisierung und Simulation von Produkten und Fügeprozessen durch den Einsatz von Virtual Reality (VR)- und Digital Mock-Up (DMU)-Technologien. Ebenso werden Berechnungen und Simulationen (z. B. FEM und CFD) sowie Produktanimationen basierend auf dem 3D-CAD-Modell durchgeführt. Programme zum schnellen Erzeugen von physischen Produktprototypen zu Versuchs- und Testzwecken durch die Verwendung des Verfahrens Rapid Prototyping und des Rapid Tooling sind ebenfalls ein Bestandteil dieser Applikationskategorie.

**Kategorie 3: CAD-unabhängige Applikationssysteme** Diese sind in der Regel Anwendungsprogramme, die keinen Bezug zur CAD-Welt haben, wie Office-Programme (Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Präsentation, E-Mails), FMEA-Software sowie Programme zum klassischen Berechnen bzw. Optimieren von Teilen, Gruppen oder Produkten (Nachberechnen oder Auslegen). Softwaresysteme zur Bereitstellung von gespeicherten Informationen in Form von Daten, Texten oder Zeichnungen vielfältigster Art sowie Content-Management-Systeme, WEB-Applikationen und Software zum Project Management und Anforderungsmanagement werden dieser Kategorie zugeordnet. Diese Applikationskategorie wird hier nicht näher betrachtet.

**Kategorie 4: Systeme für Produktdatenmanagement (PDM)** PDM-Systeme übernehmen die Modellierung, Steuerung und Optimierung von Arbeitsprozessen in der Produktentwicklung durch die Verwendung von Datenbanken und leistungsstarken Workflow-Bausteinen. In einer globalen Entwicklungsumgebung organisieren PDM-Systeme die Zugriffsberichtigungen für Produktdaten unterschiedlicher Typen (z. B. Kategorien 1-3), bieten zusätzliche Module für Visualisierung und Collaboration sowie zum Management von Produktkonfigurationen und -strukturen. PDM-Systeme spielen eine große Rolle bei der Integration von Einzelapplikationen innerhalb und außerhalb der Konstruktionsabteilung.

**Kategorie 5: ERP-/PPS-Systeme** ERP-/PPS-Systeme stellen die notwendigen Daten für die Auftragsabwicklung in Fertigungsunternehmen wie Materialien, Stücklisten usw. bereit. Diese Systeme sollen vor allem sicherstellen, dass die beauftragten Produkte zum Wunschtermin in der richtigen Menge gefertigt werden. Oft übernimmt die Konstruktionsabteilung das Anlegen und Ändern von Materialien und Stücklisten innerhalb des ERP-/PPS-Systems.

Die Anwendung der bereits aufgeführten Applikationssysteme und Einzelprogramme durch den Konstrukteur bedeutet bereits eine große Unterstützung und führt zu Produkt-

und Arbeitsverbesserung bzw. Effizienzsteigerung. Sie führen aber auch zu Unterbrechungen und Arbeitsproblemen während des Konstruktionsprozesses durch zwischengeschaltete konventionelle Tätigkeiten, durch erforderliche, wiederholte EingabeprozEDUREN mit entsprechendem Aufwand und Fehlermöglichkeiten sowie durch unterschiedliche Benutzeroberflächen, Programmstrukturen und dergleichen. Es ist deshalb naheliegend, eine Verknüpfung von Einzelprogrammen zu Programmsystemen anzustreben, mit denen der Konstruktionsprozess durchgängig und flexibel unterstützt werden kann. Eine solche Verknüpfung dient insbesondere der durchgehenden Nutzung einmal eingegebener Daten oder erarbeiteter Konstruktionsergebnisse sowie einheitlicher Datenbanksysteme. Auch die Suche und das Wiederfinden von vorhandenen Informationen zum Produkt und Prozess werden durch die Verknüpfung der einzelnen Anwendungsprogramme stark erleichtert. Diese Zielsetzung ist ein Schwerpunkt des Einsatzes von Systemen für Product Lifecycle Management (PLM)- bzw. PDM-Systemen. Mittels offener Schnittstellen wird die Integration von Businessprozessen und Anwendungssystemen ermöglicht.

In den folgenden Kapiteln wird auf die wesentlichen Anwendungsprogramme für die Produktentwicklung und -konstruktion eingegangen (Kategorien 1, 2, 3, 5).

## 7.2.2 CAD-Systeme

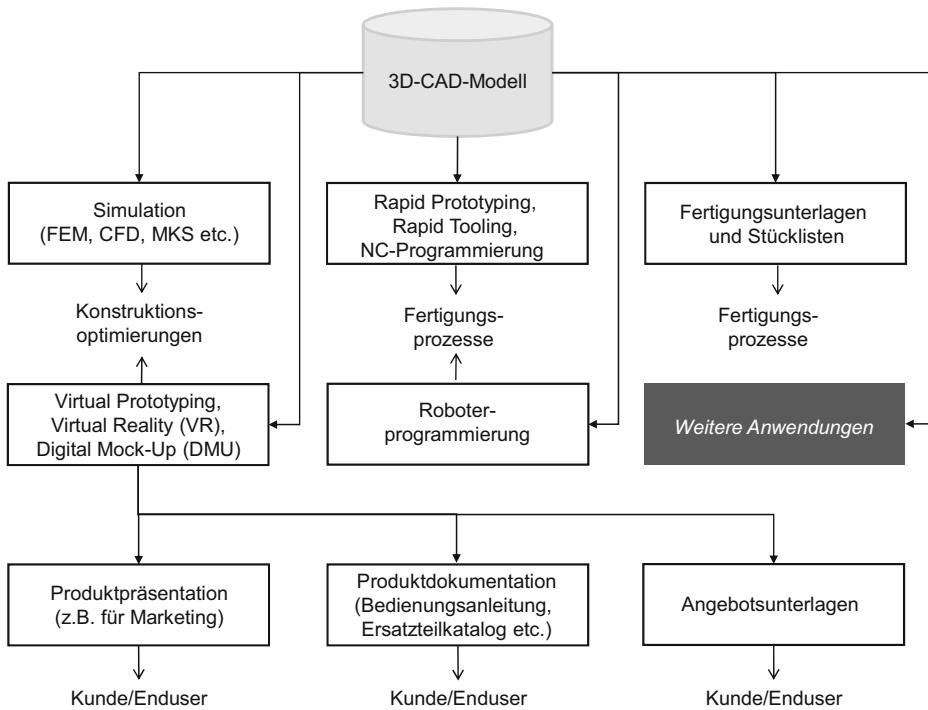
### 7.2.2.1 Einführung in die CAD-Technik

CAD-Systeme werden für unterschiedliche Anwendungen wie die Mechanik, Elektrotechnik und Elektronik eingesetzt (s. Abb. 7.3). In den Branchen Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrttechnik oder Anlagenbau ist die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit ohne die 3D-CAD-Technik nicht mehr denkbar. 3D-CAD-Systeme haben sich in den letzten Jahren zu sehr leistungsfähigen Werkzeugen entwickelt und gelten heute als wichtiges und unverzichtbares Instrument für die Unterstützung und Durchführung von Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben. Die 3D-CAD-Technik stellt damit den Backbone der Rechnerunterstützung in der Entwicklung und Konstruktion im Maschinen- und Anlagenbau dar (Feldhusen und Lashin 1996, 1999; Lashin und Feldhusen 1996; Vajna et al. 2007; Spur und Krause 1987).

Außer den genannten Branchen befassen sich immer mehr Unternehmen des Maschinenbaus mit der Einführung von 3D-CAD-Systemen oder sehen dieses als notwendigen Schritt an.

Bei der 3D-CAD-Technik liegt der Schwerpunkt in der vollständigen geometrischen Beschreibung eines Bauteils oder eines Produktes in Form eines 3D-CAD-Modells. Zahlreiche CAD-Hersteller bieten zusätzliche Module, z. B. zur Rohr- und Kabelverlegung sowie für die Blechbearbeitung.

Neben einer realitätsnahen Darstellung der zukünftigen Produkte sind 3D-CAD-Modelle auch unabdingbar für viele Simulations- und Berechnungsverfahren, Produktdokumentationen und -präsentationen. Aussagekräftige virtuelle Prototypen können heute sowohl für die Erstellung von Angebots-, Konstruktions- und Fertigungsunterlagen als auch für die Durchführung von Einbau- und Kollisionsuntersuchungen direkt am Bildschirm



**Abb. 7.3** Übersicht über die Anwendungsbereiche von 3D-CAD

verwendet werden. 3D-CAD-Daten sind auch die Basis für die realitätsnahe Visualisierung und Simulation von Produkten und Prozessen unter der Verwendung von Digital Mock-Up- und Virtual Reality-Verfahren.

Darüber hinaus bietet das Rapid Prototyping ein zeitsparendes und effektives Verfahren zur Herstellung von realen Produktprototypen. Dieses Verfahren basiert auf der Verarbeitung von 3D-CAD-Geometriedaten.

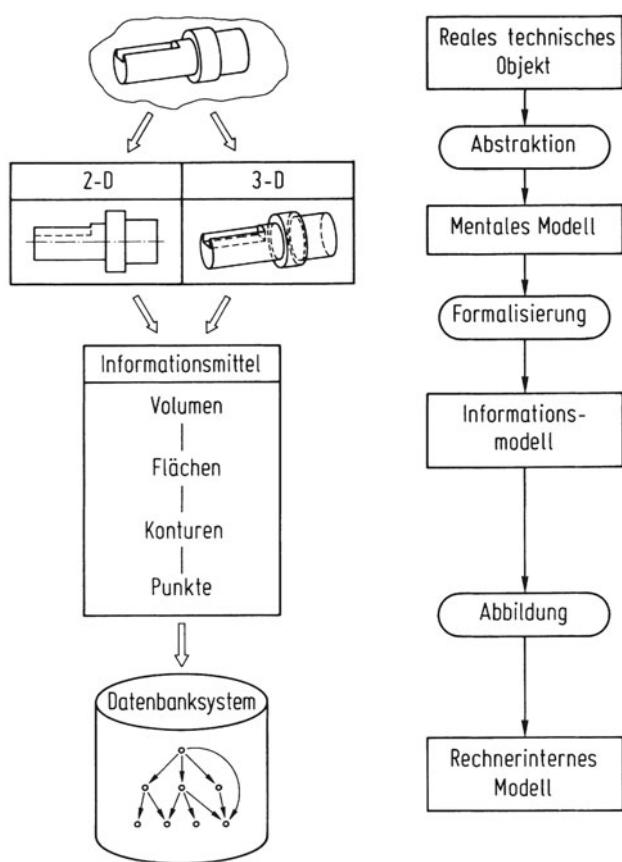
Für das Erstellen der 2D-Zeichnungen werden die notwendigen Ansichten, Schnitte und Einzelheiten definiert und in die Zeichnung übertragen. Eine notwendige Geometrieveränderung erfolgt in der Regel nicht in der Zeichnung, sondern direkt am 3D-CAD-Modell. Durch Aktualisierung der Zeichnung werden die Änderungen übernommen (Bidirektionale Beziehung).

Bei der elektrotechnischen CAD-Anwendung liegt der Schwerpunkt vor allem in der Erstellung von Schaltschranken-Layouts, Stromlauf-, und Steckerplänen sowie zur Erstellung von Klemmen- und Verbindungs-Kabellisten und zur Entwicklung bedruckter Leiterplatten (Printed Circuit Boards).

### 7.2.2.2 Rechnerinterne Darstellung von Objekten

**Mentale Modelle** Ein Modell ist eine dem Zweck entsprechende Repräsentation (der Vertreter) eines Originals (Müller et al. 1992; Roth 1988). In der Technik und beim Konstruieren werden Modelle in sehr unterschiedlicher Form benutzt, z. B. Funktionsmodelle,

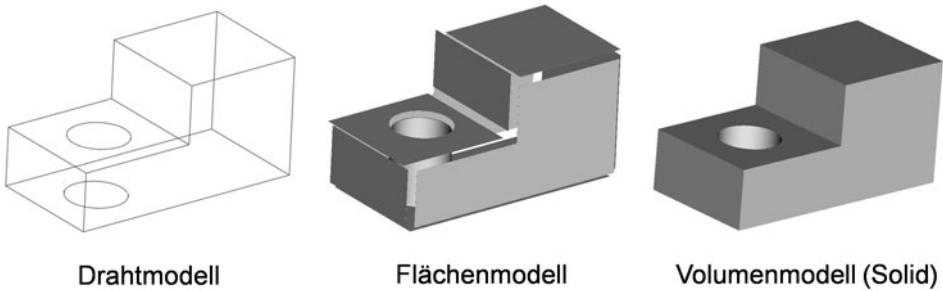
**Abb. 7.4** Modelle für technische Objekte (nach Pohlmann 1982)



Anschauungsmodelle usw. Die elektronische Datenverarbeitung erlaubt heute die Bildung von Modellen aufgrund einer rechnerinternen Beschreibung von Objekten oder Produkten in ganz neuer Art und Weise.

Während des Konstruktionsprozesses entsteht beim Konstrukteur eine Vorstellung vom beabsichtigten realen technischen Objekt. Seine Festlegung in konventionell erstellten Zeichnungen stellt dabei auch schon ein mehr oder weniger getreues Modell der wirklichen Ausführung dar. Bei einer Beschreibung mit Hilfe von CAD-Systemen ist dies nicht viel anders. Es wird ebenfalls eine Modellbildung vollzogen, deren Schritte nach Pohlmann (1982); Spur und Krause (1984) in Abb. 7.4 wiedergegeben sind.

Der Konstrukteur entwickelt eine bestimmte gedankliche Vorstellung in Form eines *mentalen Modells*, wie die Aufgabe gelöst werden könnte. Die gedanklichen Vorstellungen pendeln dabei zwischen abstrakten Zusammenhängen, die sich nur an Wirklinien oder Wirkflächen sowie Funktionsstrukturen orientieren, und schon bekannten Ausführungen, die er in Form und Kontur vor sich sieht, hin und her. Das mentale Modell wird während des Konstruktionsprozesses weiterentwickelt, abgeändert oder verworfen. Dabei ist oft eine dreidimensionale Betrachtung nötig, woraus die bekannte Forderung nach einem guten



**Abb. 7.5** Draht-, Flächen- und Volumenmodelle (solid)

„räumlichen Vorstellungsvermögen“ resultiert. Manche Konstrukteure bringen daher ihre Ideen in Skizzen mit räumlicher Darstellung (Isometrie, Dimetrie, Zentralperspektive) zum Ausdruck. Aber auch zweidimensionale Skizzen oder Zeichnungen unterstützen und klären die gedankliche Vorstellung. Hieraus geht hervor, dass der Konstrukteur sich gedanklich im Raum und in der Fläche bewegt und dazu bestimmte formale Informationsmittel, nämlich Punkte und Linien, zur Darstellung einsetzt.

**Geometriemodelle** Grundsätzlich existieren drei Modellarten, aus denen 3D-Geometriemodelle aufgebaut werden können (Spur und Krause 1984; VDI-Richtlinie 2209 2009). Bei *Drahtmodellen*, auch Linienmodelle oder Kantenmodelle genannt, werden Objekte im Raum durch ihre Konturen beschrieben, die als Linienelemente (Strecken, Kreis-/Ellipsenbögen, Freiformkurven) gespeichert werden. Drahtmodelle lassen sich aufgrund des minimalen Datenvolumens (und damit dem geringsten Speicherbedarf) am Bildschirm schnell darstellen und bewegen (Drehen, Verschieben, Zoomen). In ihrer bildlichen Darstellung sind Drahtmodelle nicht eindeutig und in ihrer geometrischen Beschreibung nicht vollständig. Sie sind deshalb für CAM-Anwendungen (Computer-Aided Manufacturing) untauglich. Es wird auch nicht festgelegt, wo sich Material befindet. Wie in Abb. 7.5 zu ersehen ist, vermag das Drahtmodell aber keine Sichtkanten, wie z. B. Mantellinien, wiederzugeben. Das Drahtmodell stellt lediglich den Umriss aufgrund der Kantendefinition dar. Dadurch können bei diesem einfachen Modell Mehrdeutigkeiten auftreten, die einer näheren Interpretation bedürfen. Drahtmodelle haben den geringsten Informationsgehalt, so dass durch fehlende Flächenassoziationen bestimmte Aussagen und Berechnungen, wie z. B. die Verschneidung und das Durchdringen von Körpern, die Verdeckte-Linien-Berechnung, andere Visualisierungen oder Schnitte nicht möglich sind.

Das *Flächenmodell* gestattet die Beschreibung von sich im Raum erstreckenden Flächen. Auch hier ist nicht festgelegt, wo sich Material befindet. Werden für ein Objekt alle Flächen zusammenhängend beschrieben, kommt man zur höchsten Stufe eines Flächenmodells, welches auch als „Closed Volume“ bezeichnet wird, ohne dabei aber die Materialkennung einzuführen. Die Flächenmodellierung wird vorwiegend vor allem dort eingesetzt, wo es auf die Eigenschaften und die Form von Flächen ankommt (z. B. im

Automobilbau für Karosserie- oder Flugzeugoberflächen), wo eine volumenorientierte Modellierung nicht sinnvoll ist oder wo fertigungstechnische Aspekte im Vordergrund stehen (VDI-Richtlinie 2209 2009). Das Flächenmodell ist dann auch häufig wichtige Grundlage weiterer konstruktiver Entwicklungen von Geräten und Einbauten.

Bei *Volumenmodellen* werden die Grundelemente wie Quader, Zylinder, Kugel oder Pyramide usw. durch Boolesche Operationen (Vereinigung, Differenz und Durchschnitt) miteinander verknüpft. Ein Volumenmodell besteht aus Flächen, die einen Raum umschließen und ihn damit definieren. Volumenmodelle erfassen nicht nur die „Hülle“ von Objekten, sondern sie besitzen darüber hinaus auch Volumen- und – sofern eine Dichte zugeordnet wird – Materialinformationen. Sie können damit neben den geometrischen auch physikalische Informationen eines Produktes erfassen. Bei Körpermodellen lassen sich Schnittberechnungen durchführen. Sie sind die Basis zur Programmierung von NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen für beliebig geformte Werkstücke.

Die interne Beschreibung von Volumenmodellen im CAD-System erfolgt entweder mit der B-Rep-Methode oder durch Constructive Solid Geometry (CSG)-Bäume. In beiden Fällen ist die Darstellung des modellierten Produktes in seiner geometrischen Erscheinung gewährleistet. Geometrische Modelle auf Grundlage der genannten Modellarten lassen sich unterschiedlich effizient erzeugen und modifizieren (Spur und Krause 1984).

Bei CSG Modellen wird das Objekt aus einzelnen einfachen Grundkörpern (Quader, Zylinder, Kegel, Torus usw.) zusammengesetzt und dann mengentheoretisch zu einem komplexen Gebilde verknüpft. Die angewandte Verknüpfungsvorschrift (Boolescher Baum) ist unverzichtbarer Bestandteil der Datenstruktur. Das CSG-Modell hat folgende Vorteile:

- geringer Speicherbedarf,
- einfache Generierung, wenn die Geometrie einfach durch definierte Grundelemente beschreibbar ist,
- Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit der entstandenen Objekte und
- die Entstehungsgeschichte der Geometrie ist im Booleschen Verknüpfungsbaum erkennbar.

Die Nachteil hinsichtlich konstruktiver Anwendung sind:

- Ein partielles Ändern einer Fläche oder Kontur ist nicht möglich. Es muss der jeweilige Körper im Booleschen Baum identifiziert, herausgelöst, modifiziert und neu generiert werden und
- das Informationsmodell erfordert die vorherige gedankliche Zerlegung des beabsichtigten Objekts in entsprechende Grundelemente, was nicht der Denk- und Arbeitsweise des Konstrukteurs entspricht, bei dem die Gestalt in der Regel schrittweise und interaktiv entwickelt wird.

Das B-Rep-Modell geht von Flächen aus, die mit Hilfe von Punkten und Kanten definiert werden und in ihrer Verknüpfung als umschließende Grenzflächen das Volumen des Ob-

jetes beschreiben. Eine Materialerkennung in Form eines senkrecht auf ihnen stehenden Vektors lässt auch den Raum erkennen, der mit Material gefüllt werden soll.

B-Rep-Modelle weisen vom konstruktiven Standpunkt folgende Vorteile auf:

- Die Gestaltentstehung kann von der Wirkfläche aus erfolgen,
- von funktionell wichtigen Flächen aus lassen sich Pass- oder Gegenflächen einfach ableiten. Es können unter Zugriff auf Punkte, Kanten oder Flächen partielle Änderungen vorgenommen werden,
- Flächen oder Kanten können Attribute zugeordnet werden und
- das B-Rep-Volumenmodell enthält alle Informationsmittel der Flächen- und Drahtmodelle, so dass eine auf- und abwärtssteigende kompatible Nutzung sowohl einfacher als auch vollständiger Modelle möglich ist.

Nachteile bestehen vor allem:

- In der Sicherstellung der Konsistenz des Modells durch besondere Algorithmen und Regeln insbesondere bei lokaler Änderung und
- in einem relativ großen Speicherbedarf.

In einem Hybrid-Modell finden sich sowohl CSG-Bäume als auch B-Rep-Darstellungen. Dabei werden B-Rep-Volumina als „komplexe Primitive“ in die CSG-Bäume integriert. Die strikte Trennung beider Modellierer-Typen ist bei den meisten der heute eingesetzten 3D-CAD-Systeme durch die Benutzungssoberfläche nach außen nicht mehr eindeutig erkennbar. Hier besteht die Möglichkeit, Zusammenhänge aus unterschiedlichen Sichten darzustellen: einerseits eine Konstruktionshistorie auf der Basis der CSG-Bäume, andererseits die Relationen aller Objekte untereinander (geometrische, topologische, Constraints usw.) und die Ergebnisse daraus durch die B-Rep-Darstellungen (Spur und Krause 1984).

Weitere detaillierte Informationen über die Modellierungstechnik in CAD-Systemen sind in der entsprechenden Literatur zu finden.

### 7.2.2.3 Anwendungsgebiete der 3D-CAD-Technik

**Erzeugen von Produktmodellen** Werden einzelne Objekte während des Konstruktionsprozesses mit Hilfe von CAD-Systemen bearbeitet, entsteht ein CAD-Modell, das interaktiv schrittweise vervollständigt bzw. modifiziert wird. Unter Modellierung wird somit das Erzeugen und Verändern der rechnerinternen Beschreibung eines Objektes verstanden. Ein Produktmodell ist in diesem Zusammenhang eine rechnerinterne Darstellung, die alle relevanten Informationen über ein Produkt in hinreichender Vollständigkeit enthält. Ein Produktmodell enthält neben geometrischen Daten auch technisch-funktionale, technologische und baustrukturelle Informationen sowie auch solche zum Konstruktions- und Fertigungsprozess. Für die Abbildung dieser Informationsinhalte eignen sich *Partialmodelle* (auch *Phasenmodelle* genannt), die zweckmäßig ausgegliederte Bestandteile eines Produkts repräsentieren. Dadurch können Funktions- und Wirkstrukturen beschrieben

und modelliert werden, die andere Daten und Zusammenhänge benötigen. Partialmodelle werden aber häufig auch für andere Teilsichten eines Produktes gebildet (Müller et al. 1992).

So arbeitet man mit geometrischen Partialmodellen, die Abmessungen von Bauteilen und Baugruppen einschließlich ihrer Toleranzen, Passungen, Oberflächenzustände und dergleichen beinhalten, oder mit baustrukturorientierten Partialmodellen, die

- die Baustruktur als Zusammenhang zwischen Teilen, Baugruppen und Erzeugnissen,
- die automatische Erstellung der Konstruktionsstücklisten und
- Fertigungs- und Montageanweisungen beschreiben.

Die Erstellung von Produktmodellen bzw. Partialmodellen wird stark durch die Features-Technologie unterstützt (VDI-Richtlinie 2218 1999), die einen Zusammenhang von Daten und Strukturen (geometrischer und nichtgeometrischer Art) zur Beschreibung und rechnerinternen Speicherung technischer Sachverhalte bei CAD Anwendungen darstellen (Rieger 1995).

Entsprechend den generellen Zusammenhängen bei technischen Produkten ist es zweckmäßig, Funktions-Features, Prinzip-Features, Bau- bzw. Bauteilfeatures und Form-Features zu definieren. Mit diesen können dann die Partialmodelle für die unterschiedlichen Konkretisierungsstufen modelliert werden (TU-Berlin 1992). Abbildung 7.6 zeigt solche Feature-Klassen am Beispiel eines Wälzlagers.

Solche Features erleichtern insbesondere dann die Eingabe und Modellierung, wenn sie unternehmensintern oder extern standardisiert sind und aus einer Feature-Bibliothek in das Produktmodell übernommen werden können, ohne jeweils neu erzeugt zu werden. Solche Standard-Features können sein:

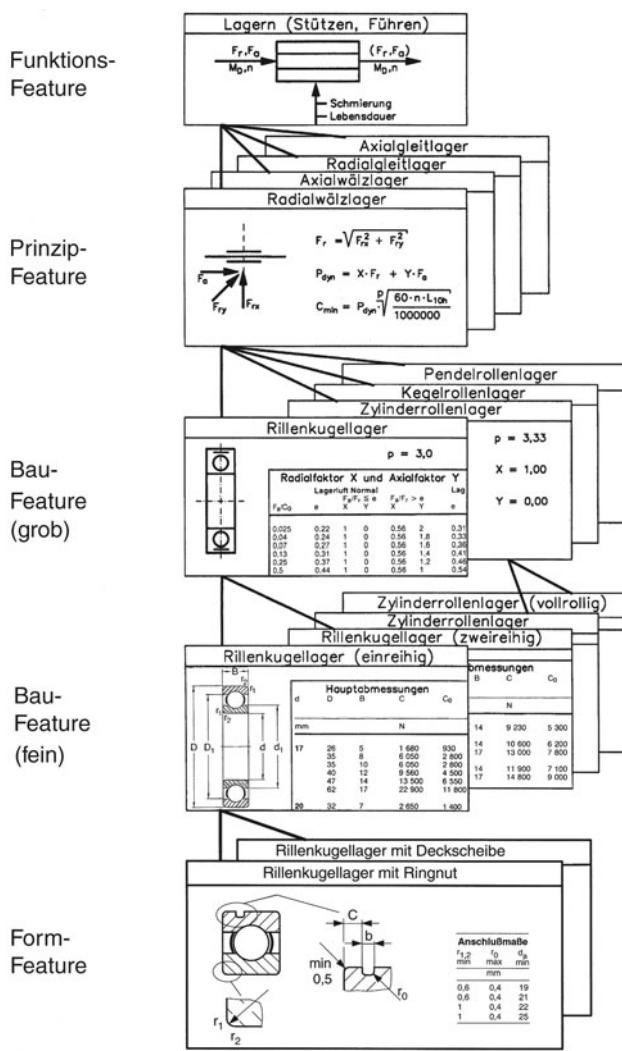
- Formelemente, z. B. Fasen, Rundungen, Nuten, Sacklöcher,
- Wirkelemente, z. B. Gewinde, Keilwellenprofile, Verzahnungen, die in Paarungen auftreten,
- Wirkkomplexe, z. B. Schrauben und Sicherungsringverbindungen, die in der Regel aus Normteilen, Form- und Wirkelementen und Zonen der Objekt- bzw. Produktgeometrie bestehen,
- Norm- und Wiederholteile.

Abbildung 7.7 zeigt als Beispiel die mit den Prinzip-Features aufgebaute Wirkstruktur des Getriebes gemäß Abb. 7.8.

Zur verbesserten Informationsbereitstellung und -verarbeitung werden auch sog. *Informations-Features* als multimediale Produktdaten- und Informationsträger definiert (Kiesewetter 1996).

Diese sollen vor allem die Referenzierung multimedialer Daten und Dokumente auf die Produktgeometrie, eine integrierte Absender- und Empfängererkennung sowie die Integrierbarkeit bzw. Kombinierbarkeit beliebiger Produktinformationen durch offene Multimediaschnittstellen ermöglichen.

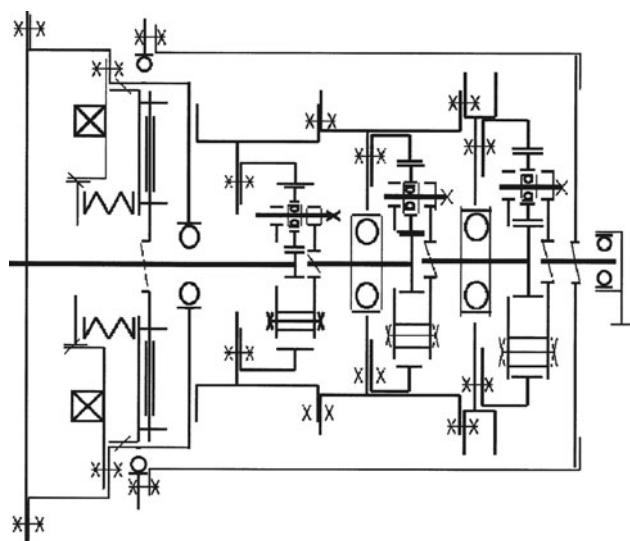
**Abb. 7.6** Feature-Klassen am Beispiel von Wälzlagern



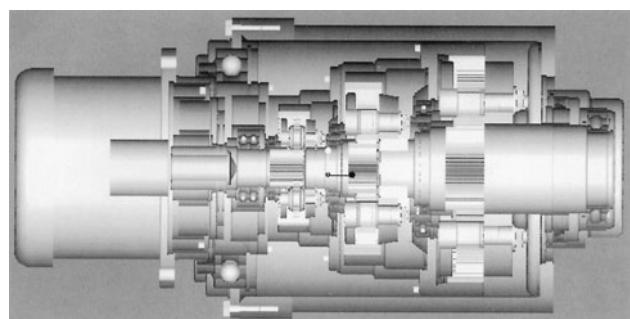
Alle Partialmodelle müssen erzeugt und modifiziert, d. h. „modelliert“, werden können, weswegen auch von jeweiligen Modellierern gemäß Abb. 7.9 gesprochen werden kann. Je nach Situation erfolgt der Zugriff zwecks Generierung, Ergänzung oder Änderung direkt oder im Zusammenhang höherer Modellierfunktionen vom übergeordneten Modellierer indirekt.

**Ableiten von 2D-Zeichnungen aus dem 3D-CAD-Modell** Trotz des enormen Anstiegs des 3D-CAD-Einsatzes in den letzten Jahren, besteht immer noch der Bedarf an der Erstellung von normengerechten 2D-Zeichnungen. Die Gründe dafür sind vielfältig. Zum einen werden 3D-CAD-Systeme überwiegend nur in den Entwicklungsabteilungen ein-

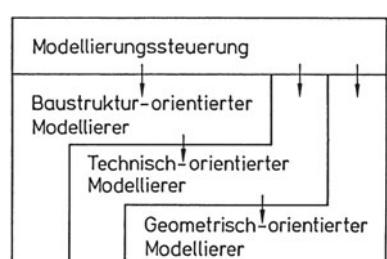
**Abb. 7.7** Wirkstruktur des Getriebes gem. aufgebaut aus Prinzip-Features (Wirkelemente, Wirkkomplexe)



**Abb. 7.8** Getriebebaugruppe für eine Laufkatze, modelliert mit dem CAD-System Pro/ENGINEER



**Abb. 7.9** Zugriff der Modellierungssteuerung auf unterschiedliche Modellierer der entsprechenden Partialmodelle



gesetzt und benutzt. Oft haben Mitarbeiter in den vor- oder nachgeschalteten Prozessen nicht das nötige Know-how, um mit 3D-Modellen umzugehen. Zum anderen können aus 2D-Zeichnungen PDF-, TIFF- oder andere neutrale Formate erstellt werden, die innerhalb oder außerhalb des Unternehmens auf einfache Art verteilt werden können und für die Langzeitarchivierung geeignet sind, was bei 3D-Modellen nicht der Fall ist.

Ein regenerierbares 3D-CAD-Modell bildet die Grundlage zum automatischen und vollständischen Ableiten von 2D-Zeichnungen. Durch diese Ableitung können häufige Übertragungsfehler gegenüber der Neuerstellung mit den damit verbundenen hohen Folgekosten vermieden werden. Die Praxiserfahrung zeigt jedoch, dass der Konstrukteur immer noch viel Zeit investieren muss, um eine normgerechte 2D-Zeichnung in einem 3D-CAD-System zu erstellen (VDI-Richtlinie 2209 2009). Auf entsprechende unterstützende Funktionen ist daher bei der Auswahl eines 3D-CAD-Systems zu achten.

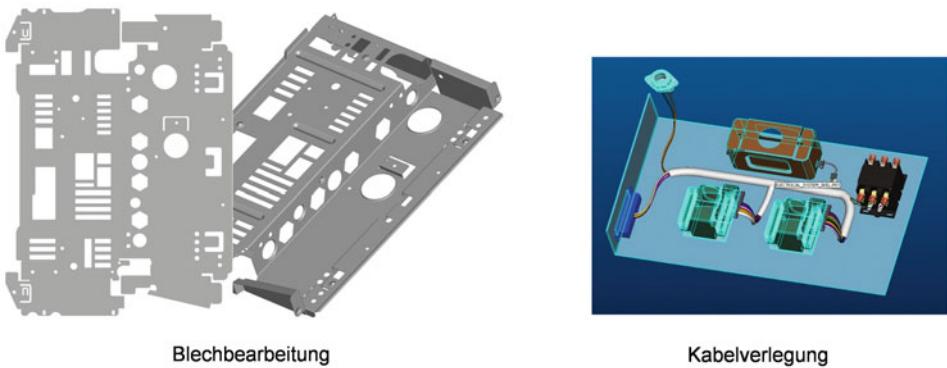
Eine bidirektionale Assoziativität ist bei den meisten 3D-CAD-Systemen derzeit nur bedingt realisiert, d. h. die gegenseitige Verknüpfung einer Dimension mit der dazugehörigen Maßzahl – ändert sich das eine, ändert sich das andere automatisch mit. Daher sollten Modifikationen nur am 3D-Modell und nicht an der abgeleiteten 2D-Zeichnung vorgenommen werden. Die Änderungen lassen sich dann teilautomatisch und ohne großen Aufwand in der assoziativ verknüpften, auf das 3D-Modell aufbauenden 2D-Zeichnung aktualisieren (VDI-Richtlinie 2209 2009).

Da bei der Erstellung der Zeichnung die 2D-Ansichten aus dem vollständigen 3D-Modell abgeleitet werden, sind prinzipiell alle Geometrieelemente in der 2D-Zeichnung dargestellt. Bei komplexen Baugruppen kann dies zu unübersichtlichen Zeichnungen führen und damit Probleme in den nachgeschalteten Abteilungen verursachen. Deshalb ist es ratsam, Baugruppen oder Teile, die für den Inhalt einer Zeichnung nicht wichtig sind, abstrahiert darzustellen oder auszublenden. Einige CAD-Systeme bieten entsprechende Methoden an, um vereinfachte 2D-Darstellungen zu erstellen.

**Blechbearbeitung und Kabel-/Rohrverlegung** Die Blechabwicklung beschreibt den unbogenen Zustand eines Bleches, der für die Herstellung eines Blechprodukts durch Abkanten benötigt wird. Für die Bestimmung der Geometrie von Produkten aus Blech wird in der Regel zunächst die gewünschte Form des fertig gekanteten Teils festgelegt und anschließend die dazu erforderliche Abwicklung ermittelt. Hierzu bieten moderne 3D-CAD-Systeme hervorragende Funktionalitäten zur nahezu automatischen Abwicklung von Blechen (s. Abb. 7.10).

In der Regel werden Rohrleitungen und Kabel manuell durch einen physischen Prototypen verlegt. Dieser Prozess ist jedoch zeitaufwändig und fehleranfällig. Umfassende Verlegungsfunktionen einschließlich automatischer Flachbandkabelverlegung werden von 3D-CAD-Systemen angeboten. Auch Bibliotheken für Standardformstücke und -anschlusselemente, die an den eigenen Bedarf angepasst werden können, werden zur Verfügung gestellt.

**Virtual Reality (VR) und Digital Mock-Up (DMU)** Mit dem Begriff *virtuelle Realität* bzw. „Virtual Reality“ (VR) wird meist die rechnergestützte Generierung eines möglichst perfekten sensorischen Abbildes der realen oder auch vorausgedachten/fiktiven Umwelt assoziiert (Henning 1997). In der Produktentwicklung wird sie zunehmend zur realitätsnahen Visualisierung und Simulation von Produkten einschließlich der Evaluierung funktionaler Zusammenhänge (Interaktion, Raumgefühl, Ergonomie und Verständnis) eingesetzt. Die



**Abb. 7.10** Blechbearbeitung und Kabelverlegung mit 3D-CAD (System Pro/ENGINEER)

VR-Technologie gibt dem Benutzer die Möglichkeit, in eine Modellwelt einzutauchen und diese direkt zu manipulieren. Bei dieser Interaktion mit dem Modell werden menschliche Wahrnehmungssinne angesprochen. In Abhängigkeit davon, wie stark der Benutzer in die künstliche Welt einbezogen wird, spricht man von immersiven und nicht-immersiven Verfahren (Spur und Krause 1987).

Die VR-Technologie wird heutzutage in der Produktentwicklung von großen Unternehmen, insbesondere Automobil-, Flugzeug- und Anlagenbau, eingesetzt und beweist anhand von mehreren Beispielen ihren Nutzen. VR-Studien werden z. B. für Designbegutachtungen, Ergonomietests, Anlagenplanung oder Montageplanung eingesetzt. VR-Modelle werden auch für Kundenpräsentationen, Schulung und Training, aber auch für Simulationszwecke, wie zur Untersuchung des Strömungsverhaltens von Fahrzeugen in virtuellen Windkanälen eingesetzt.

Die VR-Applikationen benötigen dreidimensionale Präsentations- und Interaktions-techniken. Neben einem 3D-CAD-Modellierer sind spezielle Ausrüstungen wie VR-Software, VR-Datenschnittstellen (STEP, IGES, VRML, Stereodaten), VR-Brillen, 3D-Leinwände (Caves: Computer-Aided Virtual Environments Systems), Datenhandschuhe, Kraft-Rückkopplungssensoren usw. notwendig.

Weiterhin ist ein „Reality Simulator“ erforderlich, welcher durch das Zusammenspiel von Ein- und Ausgabegeräten mit einem Echtzeit-Computersystem dem Benutzer eine künstliche Welt erfahrbar macht und ihm das Gefühl gibt, in einer „realen“ Umgebung zu agieren. Dieser Anspruch erfordert aufgrund der großen zu berechnenden Datenmengen sehr leistungsfähige Grafikrechner, die erst seit einiger Zeit zu erschwinglichen Preisen verfügbar sind.

Tracking-Sensoren erfassen Position und Orientierung von Kopf, Hand und Körper. Eingabegeräte ermöglichen die direkte Übermittlung von Befehlen oder die gezielte Manipulation von Objekten in der virtuellen Welt. Die ermittelten Daten werden über eine zentrale Softwareschleife, den Simulationsmanager, unter Berücksichtigung der Umgebungsgeometrie, damit verknüpfter akustischer Ereignisse sowie festgelegter Eingriffsregeln an spezialisierte Untersysteme zur Berechnung weitergeleitet. Aus den aktualisierten Infor-

mationen ermitteln diese die Veränderungen in Echtzeit und melden sie akustisch und optisch über Ausgabegeräte an den Benutzer zurück (Henning 1997).

Die VR Technologie ist mit hohen Kosten für Hard- und Software verbunden, was ihre Verbreitung einschränkt. Weiterhin ist der Aufwand zur Aufbereitung der 3D-Modelle relativ hoch. Selten werden reale 3D-CAD-Modelle verwendet, da sie eine hohe Rechenzeit erfordern. Die fehlende Rückkopplung von Modifikationen aus dem VR-System ans 3D-System führt zu Doppelarbeit, da Modelloptimierungen im 3D-System nachgepflegt werden müssen.

Trotzdem wird für die Zukunft eine enorme Steigerung der Leistungsfähigkeit von VR-Systemen erwartet. Preisgünstige und leistungsfähige VR-Systeme für kleine und mittelständische Unternehmen werden zur Verfügung stehen. An der heute noch nicht ausgereiften Schleife aus der VR zurück ins 3D-CAD-System muss noch gearbeitet werden.

Ein *Digital Mock-Up* bezeichnet ein virtuelles 3D-Modell eines Produktes, das die Produktstruktur (Baugruppen, Einzelteile) und deren Geometrie repräsentiert.

Die Ziele von Digital Mock-Up liegen in der geometrischen und funktionalen Integration. Zur geometrischen Integration gehört vor allem die Zusammenführung verschiedener 3D-CAD-Daten, um Kollisions-, Zugänglichkeits- und Vermessungstests durchzuführen. Weiterhin wird ein DMU für die vollständige Visualisierung von komplexen Produkten in Echtzeit benutzt.

Die funktionale Integration umfasst u. a. Crash-Simulation, Montagesimulation, Ergonomie-Tests und Festigkeitstests. Die DMU-Technologie wird hauptsächlich in Branchen angewandt, die komplexe Produkte in heterogener 3D-CAD-Umgebung entwickeln, beispielsweise im Automobil-, Flugzeug- oder Anlagenbau. Für die verteilte Produktentwicklung bietet sich das DMU als Referenzmodell an, in das jedes neu konstruierte Teil oder jede Baugruppe sofort eingebaut und dann im Gesamtprodukt gegen benachbarte 3D-Modelle geprüft werden kann (Bauraumuntersuchung).

Die Geometriemodelle aus den verschiedenen 3D-CAD-Systemen werden ins DMU überführt. Dabei werden die nach exakten mathematischen Vorschriften beschriebenen Flächen durch Flächennetze aus ebenen Flächen ersetzt, um die Visualisierung der Modelle im DMU-System zu beschleunigen. Die überführten Modelle aus den verschiedenen 3D-CAD-Systemen werden in ein Referenzmodell (DMU) eingebaut. Zur Positionierung der Teile wird ein absolutes Koordinatensystem benutzt, das von Beginn an mit allen Beteiligten abgestimmt werden muss. Die Produktstruktur, die zu Beginn der Produktentwicklung festgelegt und ebenso kommuniziert werden muss, ist im Referenzmodell abgebildet. Der Zugriff der verschiedenen Bereiche auf die DMU-Daten kann durch den Einsatz von PDM-Systemen geregelt werden.

Allerdings ist der Einsatz von DMU mit einem gewissen Aufwand für die Organisation und die Nutzung verbunden. Außerdem können DMU-Geometrien ins 3D-CAD-System nicht zurückgeführt werden, da deren Struktur bei der Konvertierung ins DMU-System geändert werden muss. Auch die Kollisionskontrollen und Maßangaben basierend auf DMU-Analysen sind von der Qualität der verwendeten bzw. konvertierten Geometriedaten abhängig.

**Rapid Prototyping und Rapid Tooling** Rapid Prototyping (deutsch: schneller Prototypenbau) ist ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von physischen Prototypen auf der Basis von 3D-CAD zu Versuchs- und Testzwecken. Dabei werden existierende 3D-CAD-Modelle ohne manuelle Umwege oder Formen direkt und schnell in physische Werkstücke umgesetzt. Die für diese Verfahrensgruppe relevante Datenschnittstelle ist das STL-Format. Die unter dem Begriff des Rapid Prototyping seit den 1980er Jahren bekannt gewordenen Verfahren sind in der Regel Urformverfahren, die das Werkstück schichtweise aus formlosem oder formneutralem Material unter Nutzung physikalischer und/oder chemischer Effekte aufbauen.

Das 3D-CAD-Modell wird in ebene Schichten geringer Dicke (0,1 mm) zerlegt („Slicing“), innerhalb der Schichten werden die Konturen der materialbegrenzten Bereiche polygonisiert. Die Geometrie wird auf diesem Wege in eine STL-Datei („Stereolithografie-Datenformat“) überführt, die sich als Quasi-Standard etabliert hat (Gebhardt 1996).

Die Slicing- und Polygonisierungsverfahren setzen eine absolut korrekte (d. h. lücken- und überlappungsfreie) Modellbeschreibung voraus.

Rapid Prototyping ermöglicht es, Prototypen von komplexen Produkten, wie z. B. Pumpengehäusen, zu erzeugen, die durch konventionelle Verfahren nur mit hohen Kosten herstellbar wären. Bei geometrisch komplexen Formen mit Hohlräumen und Hinterschneidungen bietet das Rapid Prototyping nicht nur einen entscheidenden Kostenvorteil, sondern ist auch erheblich schneller als konventioneller Modellbau.

Das Rapid Tooling dient zur Herstellung von Werkzeugen und Betriebsmitteln unter dem Einsatz der gleichen Verfahren wie beim Rapid Prototyping. Dabei unterscheidet sich die Aufgabenstellung des Rapid Tooling in einigen Punkten von der des Rapid Prototyping, da die CAD-Daten nun in fertigungstechnischer Hinsicht (Formschrägen für Gieß- oder Spritzgießverfahren, Toleranzen sowie Schweißzugaben bei Blechteilen usw.) überarbeitet werden müssen (VDI-Richtlinie 2209 2009).

**Weitere Anwendungen von 3D-CAD-Modellen** Neben den bereits beschriebenen Anwendungen von 3D-CAD-Modellen existieren weitere zahlreiche Tätigkeiten, die das 3D-CAD-Modell weiter nutzen oder verarbeiten.

*Animationen* werden zur Veranschaulichung von komplexen physikalischen Vorgängen eingesetzt, die entweder in der Realität nur schwer zu beobachten sind oder wenn die Realisierung eines physischen Prototyps für eine bestimmte Untersuchung zu kostenintensiv ist. In der Animation können die Zustandsänderungen am Objekt parallel zur oder nach Abschluss der Berechnung visualisiert werden. Auf diese Weise gewinnt der Anwender sehr früh eine bessere Vorstellung von den zu untersuchenden Abläufen.

Besonders im Anlagen- und Fahrzeugbau, aber auch in vielen anderen Branchen wird die Visualisierung von Einbau- und Kollisionsuntersuchungen direkt am Bildschirm eingesetzt. Mit Hilfe einer schattierten Bildausgabe können viele Verständnisprobleme vermieden werden (VDI-Richtlinie 2209 2009).

Die Analyse von *Toleranzkombinationen* über einfache Maßketten hinaus kann aufgrund deren räumlichen Charakters nur sinnvoll mit einem dreidimensionalen Bauteilmodell

durchgeführt werden. Daher setzen moderne Systeme zur rechnerunterstützten Toleranzverarbeitung auf 3D-CAD-Systemen auf. Sie sind entweder als Zusatzmodule in die CAD-Umgebung integriert oder nutzen als externe Programmepakete die zuvor im CAD-System erzeugten 3D-Modelle (VDI-Richtlinie 2209 2009).

Im Rahmen von CAD/CAM-Prozessketten können die im 3D-Modell hinterlegten Bau teilinformationen für die *NC-Programmierung* durch die Kopplung der beiden Systeme über entsprechende Schnittstellen verwendet werden. Eine integrierte 3D-CAD-Lösung bietet ein eigenes Softwaremodul für die NC-Programmierung, das sämtliche Funktionalitäten für die Generierung von NC-Programmen beinhaltet und in der Lage ist, direkt auf das rechnerinterne Datenmodell des CAD-Systems zurückzugreifen.

Eine weitere Anwendung der 3D-CAD-Technik in der Fertigung bietet die *Off-Line Programmierung* von Produktionsvorgängen. Es handelt sich dabei um eine werkstück orientierte Programmierung im 3D-Raum. Dabei wird die 3D-CAD-Geometrie des Werkstücks in das Offline-Programmiersystem über Schnittstellen wie DXF, VDA/FS usw. importiert. Geometrische Bewegungsbahnen (Pfade, Arbeitspunkte) am Werkstück werden visuell festgelegt. Bei der Pfadgenerierung stehen teilweise Funktionen zur Verfügung, die Prozessanforderungen berücksichtigen (z. B. für Schweißen, Lackieren, Schneiden usw.).

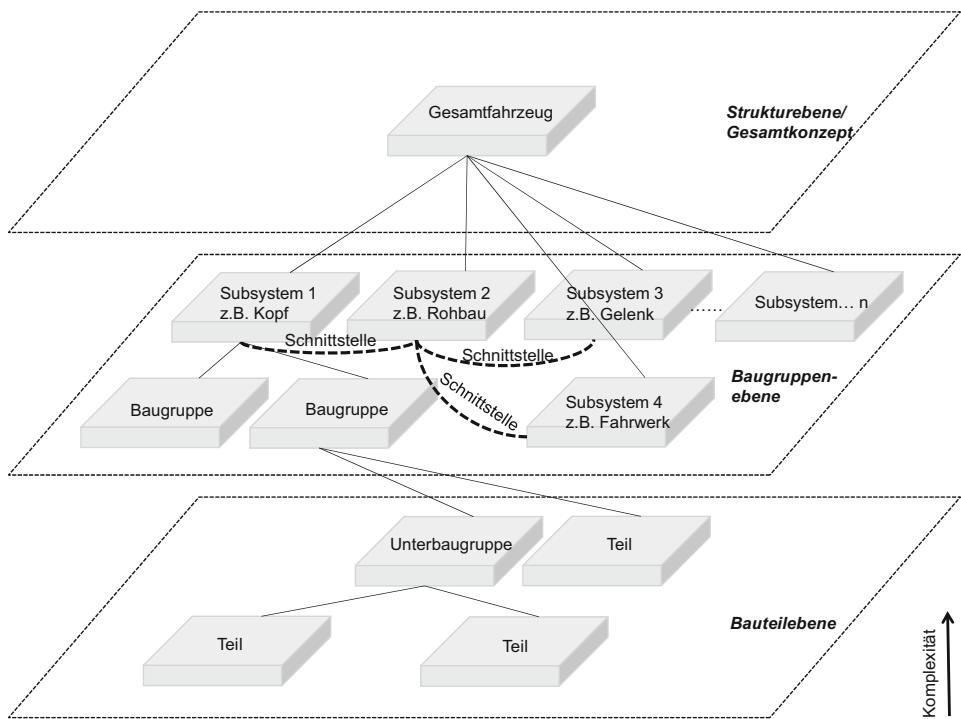
Automatisierte Montageprozesse mit Industrierobotern können auch mit Hilfe der Off-line-Programmierung bereits in den früheren Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt und geplant werden. Dabei werden Werkstückinformationen (Auflageflächen) aus dem 3D-CAD-Modell abgeleitet und mit sensorischen Daten aus einem bildverarbeitenden System abgeglichen, um die richtige Lage des Werkstücks auf dem Montageband zu ermitteln, die an den Montage-Roboter weitergegeben wird (Lashin 1992).

Weitere Details der CAD-Anwendungen in den vor- und nachgeschalteten Prozessen sind in der Fachliteratur ausführlich beschrieben.

#### 7.2.2.4 Top-Down- und Bottom-Up-Verfahren

Die zu erwartende Effizienz durch den Einsatz der 3D-Technik in der Praxis hängt stark davon ab, wie diese Technik angewendet wird. Dabei hat sich die Top-Down-Konstruktion unter Anwendung der 3D-CAD-Technik bewährt (Feldhusen und Lashin 1998). Der Grundgedanke dabei besteht in der Betrachtung unterschiedlicher Detaillierungsphasen des Produkts. Sie beginnt auf relativ abstraktem Niveau mit der Analyse des Gesamtprodukts. Im weiteren Verlauf schließt sich die Gliederung des Produkts nach produktionstechnischen und funktionalen Gesichtspunkten in genau definierte Module an (s. Abb. 7.11).

Die Top-Down-Konstruktion beginnt mit der Strukturebene des Produktes, bei der das Produkt als Ganzes betrachtet wird. Ausgehend von der geforderten Funktionalität und den aus der Nutzung resultierenden Randbedingungen und Anforderungen werden die möglichen Subkomponenten und deren Struktur sowie die äußere Grobgestalt festgelegt. Unter Beachtung der Struktur der Subkomponenten und ersten Berechnungen und Simulationen zur Festigkeit und Kinematik – falls notwendig – wird der erforderliche Bauraum der Subkomponenten bestimmt. Es werden in dieser Ebene die Produktstruktur, also die baulichen Zusammenhänge, und die Funktionsstruktur, also die funktionalen Zusammen-



**Abb. 7.11** Ebenen des Top-Down-Konstruktionsprozesses am Beispiel Straßenbahnfahrzeuge (Feldhusen und Lashin 1998)

hänge, festgelegt. Am Beispiel von Schienenfahrzeugen (Straßenbahn) werden in dieser Phase die Außenabmessungen, die Kopplungsart und -höhe, die Anzahl der Fahrwerke, die Anzahl der Gelenke sowie die Lage der Hauptkomponenten, wie Türen (Art, Anzahl, Abmessungen), Stromrichter usw., sowie die Bauraumbegrenzung für den Innenraum des Fahrzeugs bestimmt (Feldhusen und Lashin 1998).

In einer weiteren Phase der Top-Down-Konstruktion führt die genauere Betrachtung produktionstechnischer Gesichtspunkte sowie die Definition von Schnittstellen der Subkomponenten untereinander zur endgültigen Festlegung von Baugruppen, deren zulässigen Bauräumen und Schnittstellen. Hiermit ist die Produktgliederung und damit die zweite Ebene des Produkts aufgestellt. Wichtig ist, dass eine feste Einbaureferenz im 3D-CAD-Modell der Baugruppe und des Teils definiert ist. Diese Einbaureferenz wird durch die bereits festgelegte Produkt-Struktur bestimmt und darf nicht mehr geändert werden. Ebenfalls werden notwendige Beziehungen zwischen Baugruppen und Komponenten im Modell festgelegt. Sie sollen jedoch einfach abrufbar und nicht kompliziert aufgebaut sein. Die Baugruppen werden in dieser Phase abstrahiert dargestellt. Am Beispiel Straßenbahn wird jetzt u. a. der Rohbau und dessen Gliederung in Untergestell mit Hauptquerträger, Gelenkquerträger, Seitenwand, Kopf und Dach festgelegt, wobei die Geometrie größtenteils definiert ist.

Die Abstraktion von CAD-Modellen bedeutet, dass die für die Entwicklung des Gesamtlayouts nicht benötigten Details im 3D-Modell noch nicht beschrieben sind. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Übersichtlichkeit von großen Baugruppen am Bildschirm und verkürzt die Antwortzeiten bei der Bearbeitung und das Regenerieren des 3D-CAD Modells wesentlich.

Die Abstraktion des 3D-Modells soll nach einem auf das Produkt abgestimmten Schema erfolgen. Zur Vorgehensweise beim Abstrahieren von 3D-Modellen vgl. Lashin und Feldhusen (1996).

Die dritte Ebene des Top-Down-Prozesses bildet die Bauteilebene. Betrachtet werden die Einzelteile der Baugruppen und deren Struktur sowie Schnittstellen und funktionale Zusammenhänge untereinander. Die Ausarbeitung der Einzelteile geschieht unter Berücksichtigung des räumlichen Kontextes, um evtl. Konsequenzen und Beeinträchtigungen auf die Geometrie benachbarter Bauteile oder Baugruppen sofort zu erkennen. In dieser Phase können Norm- und Zukaufteile aus den entsprechenden Bibliotheken oder Programmen übernommen werden. Fertigungsgerechte Unterlagen von den Bauteilen bzw. Montagezeichnungen werden dabei erstellt.

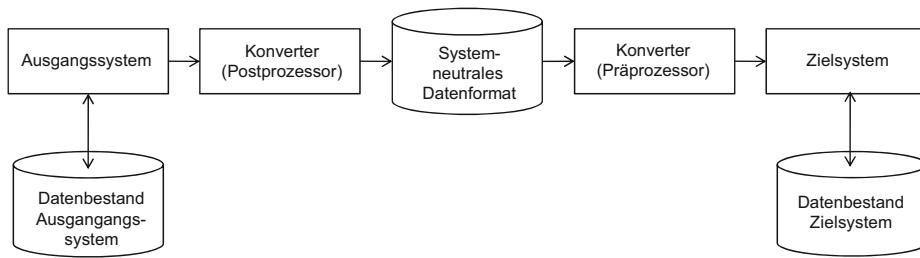
Beim Bottom-Up-Verfahren werden zunächst abgegrenzte Teile/Komponenten mit elementaren Operationen und Funktionen im CAD-System entworfen bzw. vollständig modelliert, mit deren Hilfe dann größere, darüberliegende Abstraktionsebenen (Strukturen) entworfen werden können. Dabei werden die einzelnen Teile, Unterbaugruppen, Baugruppen usw. von „unten“ nach „oben“ schrittweise zusammengesetzt, bis der Gesamtentwurf steht.

### 7.2.2.5 CAD-Datenaustausch

Der höchste Grad der CAD-Durchgängigkeit kann erreicht werden, wenn alle Unternehmensbereiche und Zulieferer bzw. Entwicklungspartner dasselbe CAD-System anwenden und auf die gleiche Datenbasis zugreifen. Dieses Ziel kann in der Realität kaum erreicht werden, da ein derartiger integrierter Ansatz keine wirtschaftliche Lösung für die unterschiedlichen Anforderungen der Unternehmensbereiche und der Zuliefererindustrie bietet. Aus diesem Grund – auch historisch bedingt – existieren heute auf dem Markt zahlreiche CAD-Systeme, die unterschiedliche Stärken bei Themen wie Flächen-, Features-, Baugruppenmodellierung, Zeichnungserstellung, Schnittstellen usw. aufweisen. Oft werden solche unterschiedlichen Anforderungen nicht durch ein einziges CAD-System erfüllt. Es besteht deshalb der Bedarf, Daten zwischen CAD-Systemen über geeignete Schnittstellen auszutauschen und damit die Effizienz der Zusammenarbeit in einer Multi-CAD-Umgebung zu erhöhen.

Bei den CAD-Schnittstellen gibt es zwei Möglichkeiten: Neutrale Schnittstellen und Direktschnittstellen zum Verbinden von bestimmten CAD-Systemen.

Für den CAD-Datenaustausch über neutrale Schnittstellen existieren verschiedene Standards (Haasis 1995). Post- und Pre-Prozessoren, die in der Regel Bestandteile des CAD-Systems sind, übernehmen das Erzeugen bzw. Einlesen der neutralen Datenformate (s. Abb. 7.12). Für 2D-CAD, vor allem Zeichnungsdaten, hat sich der IGES Standard durchgesetzt und wird häufig verwendet. IGES steht für Initial Graphic Exchange Specification.



**Abb. 7.12** CAD-Datenaustausch über systemneutrales Datenformat (Vajna et al. 2007)

DXF-Dateien (Drawing Interchange Format) sind ein ASCII- oder binäres Dateiformat zum Austausch von Vektor-Daten, vor allem zwischen 2D-CAD-Systemen, und wurde von Autodesk entwickelt. Es spielt vor allen Dingen als Schnittstelle von und nach AutoCAD eine Rolle.

Beim Austausch von Freiformflächen, die häufig im Karosseriebau anzutreffen sind und die mit flächenorientierter 3D-Software erstellt werden, kommt vor allem in der Automobilindustrie häufig die vom VDA entwickelte Flächenschnittstelle VDA-FS zum Einsatz.

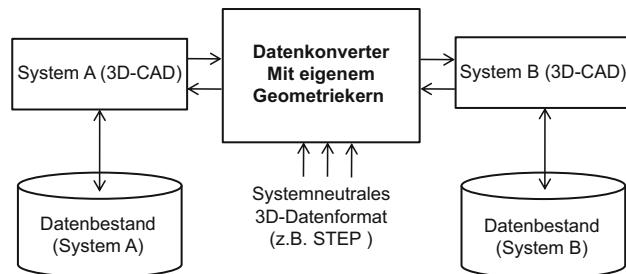
Bei der Schnittstelle STEP (STandard for the Exchange of Product model data) handelt es sich um eine von der ISO initiierte Schnittstellennorm (ISO 10303), die über den reinen Geometriedatenaustausch (wie über DXF oder IGES) hinausgeht. Mit STEP sollen möglichst alle Produktdaten, die während der Produktlebensdauer anfallen, dargestellt und zwischen unterschiedlichen CAx-Systemen übertragen werden können. Dazu zählen sämtliche Informationen eines Produktes – vom Erstentwurf bis zur Stilllegung. Das Produktmodellkonzept von STEP beruht auf der Erzeugung eines Gesamtmodells, das sich in Paritalmodelle mit bestimmten, abgegrenzten Informationsinhalten gliedert, die miteinander verknüpft sind und so in Beziehung zueinander stehen.

Mit STEP besteht die Möglichkeit, bei Zusammenbauten Informationen über die hierarchische Struktur weiterzugeben. Der Verein ProSTEP wurde gegründet, um die Umsetzung des Standards STEP in marktgängige Produkte und Dienstleistungen zu fördern.

Obwohl Datenaustauschschnittstellen weit verbreitet sind, bereiten sie jedoch bis heute wegen Datenverlusten bei der Konvertierung von Originaldateien oder bei der Übertragung der konvertierten Daten ein grundsätzliches Problem. Informationsverluste beim Datenaustausch können unterschiedliche Gründe haben (Roller 1995). Zum einen kann der verwendete Datenaustauschstandard nicht in der Lage sein (oder nur unzureichend), bestimmte Informationen zu spezifizieren, deshalb gehen diese Daten beim Konvertieren verloren. Zum anderen kann die Schnittstelle im Zielsystem (Präprozessor) nicht vollständig sein, oder einige Informationen können im Zielsystem nicht rechnerintern verarbeitet werden.

Bei den Direktschnittstellen werden CAD-Systeme verbunden, indem das vorliegende native Format von System A direkt in das native Format des Empfangssystems System B umgesetzt wird. Dabei werden die Originaldaten des sendenden 3D-CAD-Systems (A) ins

**Abb. 7.13** Direkte Konvertierung von 3D-CAD-Datenbeständen



Format des empfangenden Systems (B) durch einen eigenen entwickelten Geometriekern übertragen (s. Abb. 7.13). Nativformate der gängigen 3D-CAD-Systeme sowie Schnittstellenformate wie STEP werden dabei unterstützt. Die konvertierten Daten können im Zielsystem bearbeitet werden (<http://www.coretechnologie.de>).

### 7.2.2.6 Praktische Hinweise zur Implementierung von 3D-CAD-Systemen

Die Erfahrung bei der Einführung von 3D-CAD-Systemen führt oft zu der Erkenntnis, dass die Entscheidung für 3D-CAD überwiegend nach strategischen Gesichtspunkten gefällt und die Frage nach der Wirtschaftlichkeit als Kriterium der Entscheidungsfindung nicht in den Vordergrund gestellt wird. Weiterhin zeigt die Praxiserfahrung, dass die Implementierungsphase in einigen Fällen relativ lange Zeit in Anspruch nimmt, was vom Umfang des 3D-CAD-Systems und der Motivation der Anwender abhängig ist. Ebenso erfordert die 3D-CAD-Technik eine Änderung der konventionellen Arbeitsweise im Unternehmen.

Auch der Umgang mit der 3D-CAD-Technik ist eine zusätzliche Herausforderung für den Konstrukteur. Der sichere Umgang mit dem System und die profunde Kenntnis von Arbeitsweise und interner Datenstrukturierung sind wichtige Voraussetzungen für eine effiziente Nutzung dieser Technik. Nur wer diese Zusammenhänge wirklich versteht, ist in der Lage, ein Modell mit korrekter Geometrie und sauberer Datenstruktur zu erzeugen, das jederzeit auch von anderen Anwendern mühelos verstanden und modifiziert werden kann. Das erfordert eine intensive Schulung und Betreuung der 3D-Anwender. Wie sich in der Praxis oftmals zeigt, ist mit einigen Tagen Anwendungstraining die Voraussetzung dafür kaum zu schaffen.

Trotz des enormen Anstiegs von 3D-CAD-Implementierungen in den letzten Jahren gibt es zahlreiche Unternehmen, die entweder nur 2D-CAD-Systeme anwenden oder gar keine CAD-Implementierungen haben (Spur und Krause 1987). Die Gründe dafür können u. a. darin liegen, dass diese Unternehmen nicht bereit sind, entsprechende Investitionen zu tätigen oder ihnen eine transparente Vorgehensweise zur Einführung der 3D-Technik in die Praxis fehlt. Aus diesem Grund werden hier wertvolle Erfahrungen aus der Praxis zur Implementierung von 3D-CAD-Systemen zusammenfassend wiedergegeben (Feldhusen und Lashin 1994, 1997, 1999).

*Bildung eines Teams für die 3D-CAD-Implementierung* Für die Einführung eines 3D-CAD-Systems soll ein kleines Team gebildet werden. Die Aufgabe des Teams besteht in der

Definition von notwendigen Maßnahmen im Rahmen der Einführung, vor allem die Auswahl der CAD-Soft- und Hardware, Organisation der Schulung, Betreuung der Anwender und Beschreibung von firmenspezifischen Richtlinien zum Umgang mit 3D-CAD. Falls 3D-CAD-Know-how im Unternehmen nicht vorhanden ist, kann im Allgemeinen Unterstützung von außen (neutrale Consulting-Unternehmen) in Anspruch genommen werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die gesamte Verantwortung in den Händen der eigenen Mitarbeiter bleibt. Dies ist erforderlich, damit während des Projektverlaufs wichtiges Know-how aufgebaut wird, welches für das Unternehmen in den späteren Phasen der Implementierung unerlässlich ist.

*Erstellung des Anforderungsprofils* Die erste Aufgabe des 3D-CAD-Projektteams ist die Erstellung eines Anforderungsprofils, in dem alle Anforderungen ermittelt werden, die das einzuführende 3D-CAD-System erfüllen muss. Alle 3D-CAD-Systeme haben ihre Stärken und Schwächen auf bestimmten Anwendungsbereichen. Es ist deshalb vor ihrer Beschaffung wichtig, die auf das eigene Produkt bzw. Prozess abgestimmten Anforderungen genau zu definieren und unternehmensspezifische Besonderheiten, z. B. Schnittstellenproblematik zu vorhandenen Programmen abzuklären. Dabei soll u. a. auf folgende Punkte geachtet werden: System-Bedienfreundlichkeit, Umfang der Funktionalitäten (3D sowie 2D), Schnittstellen, Zusatzmodule für Rohr-/Kabelverlegung sowie zur Blechbearbeitung, mitgeliefertes Verfahren zur Erstellung von Variantenkonstruktionen usw.

*Auswahl der CAD-Hard- und Software (Benchmark)* Nach der Erstellung des Anforderungsprofils kann mit der Auswahl der CAD-Hard- und Software begonnen werden. Dazu ist die Durchführung von Benchmark-Tests erforderlich. Bei den Benchmark-Tests handelt es sich um Voruntersuchungen, bei denen CAD-Systeme verglichen werden. Ziel der Tests ist es, herauszufinden, welches CAD-System die Anforderungen des Unternehmens und mit welchem Aufwand erfüllen kann.

Der Benchmark-Test liefert eine erste Bewertung des 3D-CAD-Systems. Eine Pilotphase von ca. drei bis sechs Monaten vor Ort und mit eigenen Mitarbeitern muss dann nach der Entscheidung durchgeführt werden, um die Systemfunktionalität genauer zu validieren. Die Hardware-Infrastruktur soll mit der zuständigen IT-Abteilung abgestimmt werden. Es existieren heute preiswerte und sehr leistungsstarke Client-Workstations, sodass die Investitionen für Hardware keine große Rolle mehr spielt.

*Pilotprojekt und Testphase* Hierfür wird ein Testteam aus Anwendern gebildet, welches das System für längere Zeit an einem Pilotprojekt testen soll. Ziel dieser Testphase ist es, eine genauere Bewertung des einzuführenden Systems unter den vorgegebenen Randbedingungen zu erreichen.

Das Testteam soll aus Anwendern der Bereiche bestehen, in welchen das System später eingesetzt wird. Bei der Auswahl der Mitarbeiter des Testteams dürfen nur motivierte und überzeugte Mitarbeiter herangezogen werden. Nicht motivierte Mitarbeiter werden die Teamarbeit immer dazu benutzen, sich in der Gruppe zu verstecken und die neue Technik

für schlechte Arbeitsergebnisse verantwortlich zu machen. Kritikpunkte aus dieser Phase sollen umfassend dokumentiert und mit dem Systemhersteller besprochen werden. Beim Pilotprojekt handelt es sich um praktische Arbeitspakete, welche das Testteam am neuen System erledigen soll. Im Vorfeld müssen sinnvolle, überschaubare und abgeschlossene Arbeitspakete festgelegt werden, die aus verschiedenen Anwendungsbereichen stammen. Sie sollen möglichst aus einem laufenden Projekt definiert werden. Um Risiken zu minimieren, soll das Pilot-Projekt keinen Termindruck haben.

*Schulung und Betreuung* Ein Schulungskonzept kann in Zusammenarbeit mit dem 3D-CAD-System-Hersteller oder mit einem externen Berater erarbeitet werden. Dabei wird der Umfang des benötigten Schulungsinhaltes für die Pilotphase und für den breiten Einsatz festgelegt. Typische Schulungsinhalte sind u. a. Teile- bzw. Flächenmodellierung, Baugruppenkonstruktion, Blechbearbeitung oder Zeichnungserstellung. Weitere spezielle Schulungen, z. B. für Kabelverlegung, sollen nur ausgewählte Anwender bekommen.

Die Schulung wird sinnvollerweise in verschiedenen Stufen durchgeführt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass ein deutlicher Übungs- und Umsetzungszeitraum von ca. zwei bis vier Wochen zwischen den Schulungen erforderlich ist. Der gesamte Aufwand für Schulung per Mitarbeiter beträgt 10-15 Tage. Weitere spezielle Schulungen können diesen Aufwand weiter erhöhen.

*Analyse der Testphase und Entscheidung* Nach der Testphase ist eine genaue Analyse und Auswertung der Ergebnisse notwendig. Wichtige Erkenntnisse aus dieser Phase für die Entscheidung sind u. a. der Einarbeitungsaufwand, die System-Performance, die Akzeptanz der Anwender und die Kompetenz des CAD-Herstellers bei der technischen Beratung. Nach einer positiven Entscheidung muss ein Plan für den breiten Einsatz ausgearbeitet werden, der die verschiedenen Ausbaustufen und Termine festlegt.

### 7.2.2.7 Chancen und Grenzen der CAD-Technik

Ein Datenverarbeitungs (DV)-System kann nur Operationen durchführen, die mit einer eindeutigen Vorgehenslogik festlegbar, d. h. algorithmierbar, sind. „Schöpferisch-kreative“ Arbeitsschritte, wie sie insbesondere beim Beurteilen und Auswählen von Lösungen aufgrund komplexer Anforderungsprofile erforderlich sind, können dem Rechner nicht übertragen, allenfalls von diesen im Dialogbetrieb unterstützt werden (Forkel 1995). Somit kann nur das verarbeitet werden, was an Daten, Datenstrukturen und operativen Anweisungen eingegeben wird bzw. in Form von Programmen und Daten vorliegt. Diese Feststellung schließt wissenbasierte Systeme mit ein, bei denen zwar rechnerinterne Entscheidungen getroffen werden, deren Grundlage aber auch gespeichertes Wissen, z. B. in Form von Entscheidungstabellen, ist.

Betrachtet man die Anwendung von 3D-CAD-Systemen, ist bei der Ersteingabe geometrischer Objekte in der Regel kein genereller Zeitvorteil gegenüber konventionellem Zeichnen gegeben, es sei denn, man kann die Möglichkeiten der Vervielfältigung von Teilen und Baugruppen sowie die Anwendung von Norm- und Wiederholteilen in Form von

Makros bzw. Features stärker nutzen. Die entscheidenden Vorteile von 3D-CAD-Systemen liegen dagegen in der vielfältigen Nutzung des gespeicherten rechnerinternen Geometrie- bzw. Produktmodells. Wie bereits erläutert, bietet die 3D-CAD-Technik hervorragende Funktionalitäten zur Variantenbildung, zum schnellen Anfertigen von Ansichten, Schnitten, Explosionszeichnungen, räumlichen Darstellungen und Teilzeichnungen einschließlich Be- maßungen bei Vorgabe unterschiedlicher Maßstäbe, zum Darstellen kinematischer Abläufe und Simulieren von Montagevorgängen, zum Anfertigen von Arbeitsplanungsunterlagen durch rechnerinterne Weitergabe der Konstruktionsdaten sowie zur automatischen Ableitung von Steuerbefehlen für NC-Werkzeugmaschinen. Betrachtet man die Aufgaben in Entwicklung und Konstruktion, so kann man feststellen, dass der derzeitige Schwerpunkt der 3D-CAD-Technik im Entwerfen und Ausarbeiten liegt. Trotzdem werden immer mehr Versuche unternommen, die Arbeitsschritte der Konzeptphase durch die Rechnerunterstützung zu optimieren. Beitz und Mitarbeiter (Beitz 1990; Beitz und Kuttig 1992; Kuttig 1992) haben im Rahmen eines Konstruktionsleitsystems Programm-Module entwickelt, mit denen die Aufstellung einer Anforderungsliste unterstützt (Groeger und Klein 1992; Groeger et al. 1992), die Analyse der Anforderungen durch den Rechner nach Klassen ermöglicht, das Erkennen von Funktionen und Bilden von Funktionsstrukturen erreicht sowie das Erarbeiten von Wirkprinzipien und Wirkstrukturen durchgeführt werden können.

Weitere Unterstützung bieten Partialmodelle für die Konzeptphase, bei denen eine Festlegung für eine Symbolik zur Beschreibung von Funktionen und Funktionsstrukturen sowie von Wirkprinzipien festgelegt wird (Kuttig 1992; Beitz und Feldhusen 1991; Dierner 2000; Groeger 1992). Zur Lösungssuche für einzelne Teilfunktionen müssen Lösungsspeicher zur Verfügung stehen, aus denen geeignete Wirkprinzipien abgerufen werden können.

Zur Variation solcher Wirkstrukturen eignen sich z. B. *semantische Modelle*, mit denen die Bedeutung der einzelnen Elemente einer Wirkstruktur beschrieben und anschließend mit Hilfe geeigneter Strategien Verknüpfungsvarianten abgeleitet werden können (Groeger 1992; Stürmer 1990). Trotz der mit dem Schrifttum genannten Entwicklungen ist der Rechnereinsatz in der Konzeptphase erst am Anfang. Das liegt zum einen an den noch stark begrenzten Möglichkeiten der CAD-Systeme für Handskizzeneingabe und -verarbeitung (Liu 1995) sowie zur Modellierung von Funktionsstrukturen einschließlich der notwendigen Verknüpfungen, zum anderen vor allem an der starken Durchdringung der Konzeptphase mit kreativ-schöpferischen Tätigkeiten, wozu menschliches Denken und die Erfahrungen des Konstrukteurs erforderlich sind. Trotzdem werden Versuche unternommen, durch Entwicklung kognitiver Werkzeuge zum Problemlösen die Rechnerunterstützung zu steigern (Forkel 1995). Aus heutiger Sicht stellt die Konzeptphase somit ein erhebliches Potenzial zur Weiterentwicklung der 3D-CAD-Technik dar.

Hinsichtlich der Bearbeitung von Konstruktionsaufgaben unterschiedlichen Neuheitsgrades sind CAD-Systeme vor allem für Variantenkonstruktionen geeignet, bei denen alle Teile und Baugruppen, ihre Größenbereiche, ihre möglichen Kombinationen sowie die Berechnungs- und Verknüpfungslogiken bekannt bzw. vorab entwickelt sind, so

dass im Auftragsfall die Konstruktionsarbeit in einem festen Algorithmus mit bekannten Daten durchgeführt werden kann. Auch bei Anpassungskonstruktionen, bei denen Konzept und genereller Entwurf vorliegen, können die kundenseitigen Anforderungen durch gestaltende und berechnende Anpassungen rechnerunterstützt durchgeführt werden, wenn das die rechnerintern gespeicherten Geometrie- bzw. Produktmodelle und Berechnungsalgorithmen zulassen.

Bei Neukonstruktionen wird dagegen auch künftig der Anteil konventioneller Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten noch recht hoch bleiben, da die Konzipierungsschritte weitgehend die Kreativität des Konstrukteurs erfordern.

### 7.2.3 Systeme für Berechnung und Simulation (CAE)

Berechnungen und Simulationen sind heute ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsarbeit und dienen dazu, die funktionalen Anforderungen an das Produkt frühzeitig abzusichern. Typische Anwendungen für Simulationen in der Produktentwicklung sind die Strukturanalyse mit der Finite Elemente Methode (FEM), die Numerische Strömungstechnik (CFD) und die Systemsimulation.

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3633 (2007) ist „Simulation das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden. Ein Modell ist in diesem Zusammenhang ein materielles oder immaterielles (vorausgedachtes) Gebilde, das geschaffen wird, um ein Original zu repräsentieren und so einen bestimmten Zweck erreichen zu können.

Bei der Berechnung und Simulation wird eine Vereinfachung im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche eines Vorganges durchgeführt. Eine Reduzierung kann beispielsweise an den Materialeigenschaften, an der Geometrie, an den Randbedingungen usw. erfolgen. Eine zu geringe Detaillierung des Simulationsmodells führt zu groben und daher nur bedingt verwendbaren Ergebnissen. Ist die Detaillierung des Modells zu hoch gewählt, steigt der Zeitbedarf zur Erstellung des Simulationsmodells und zur Durchführung des Rechenvorganges für jedes einzelne Experiment [Kuhn, Rabe]. Aus diesem Grund spielt die Aufbereitung von Simulationsmodellen die zentrale Rolle bei der Durchführung von Simulationsaufgaben und benötigt – abhängig von der Aufgabe – große Erfahrung, um zu aussagekräftigen Ergebnissen mit vertretbarem Aufwand zu kommen.

Durch FEM-Simulationen können beispielsweise Bauteile hinsichtlich ihrer Verwendung und Belastung optimiert werden. Es lassen sich teilweise deutliche Materialreduzierungen durchführen und somit Gewicht und Kosten ohne Einbußen in der statischen Belastbarkeit einsparen. Auch Dauerhaltbarkeit und Auslegung von Bauteilen können durch Simulationen untersucht werden.

Die Numerische Strömungsmechanik (CFD) erlaubt Einsichten in komplexe Strömungsvorgänge, wie sie sich auf experimentellem Wege nicht oder nur mit erheblich mehr Aufwand erzielen lassen.

Die Systemsimulation bietet ideale Unterstützung zum Verständnis und zur Optimierung von Produkten, die aus mehreren Modulen oder Teilsystemen bestehen und deren Gesamtverhalten von der Wechselwirkung einzelner Module bestimmt wird.

### 7.2.3.1 Strukturanalyse mit Finite Elemente Methode (FEM)

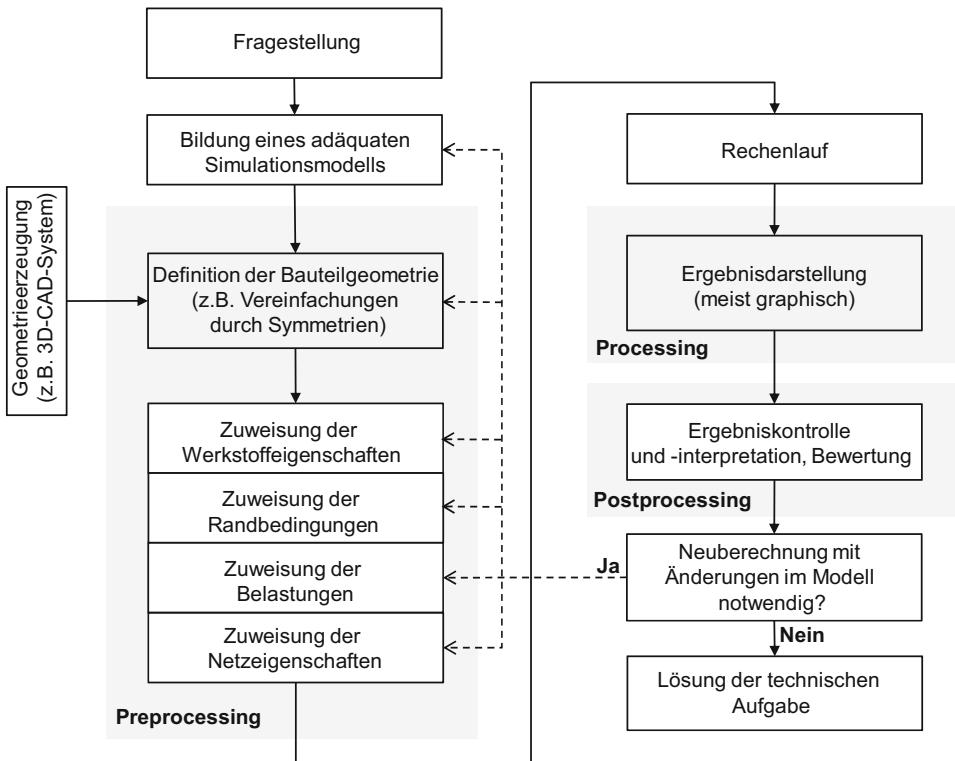
Die Finite Elemente Methode (FEM) ist ein allgemeingültiges numerisches Berechnungsverfahren zur Lösung mathematisch beschreibbarer Probleme der angewandten Physik. Damit lassen sich Bauteile unter statischen und dynamischen Betriebsbedingungen simulieren, die den realen Verhältnissen sehr nahe kommen. Allerdings muss dafür ein erheblicher Aufwand getrieben werden. In der technischen Anwendung liegt der Schwerpunkt von FEM in der Untersuchung des physikalischen Verhaltens von einzelnen Bauteilen und ganzen Systemen. Von besonderem Interesse sind hierbei der Festigkeitsnachweis, die Spannungsanalyse, das Deformationsverhalten, die Temperaturverteilung in thermisch beanspruchten Bauteilen, die Materialermüdung bei sicherheitsrelevanten Komponenten und die Bauteiloptimierung in Bezug auf Materialeinsparung oder Leichtbau. Darüber hinaus wird durch FEM-Simulationen versucht, die Aufwände für das Anfertigen teurer physischer Prototypen zu minimieren oder dieses, wenn möglich, ganz zu vermeiden.

Bei der FEM-Berechnung wird das Berechnungsgebiet in eine beliebig große Anzahl von Elementen unterteilt, die „endlich“ (finit) und nicht unendlich (infinit) klein sind. Diese Elemente lassen sich mit einer endlichen Zahl von Parametern beschreiben. Innerhalb dieser Elemente werden Ansatzfunktionen definiert. Setzt man diese Ansatzfunktionen in die zu lösende Differentialgleichung ein, erhält man zusammen mit den Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen ein Gleichungssystem, welches in der Regel numerisch gelöst wird. Die Größe des zu lösenden Gleichungssystems hängt maßgeblich von der Anzahl der finiten Elementen ab. Die Lösung dieses Gleichungssystems stellt letztlich die numerische Lösung der betrachteten Differentialgleichung dar (VDI-Richtlinie 2209 2009).

Die Durchführung einer FEM-Analyse kann im Wesentlichen in sechs Hauptabschnitte unterteilt werden, die in Abb. 7.14 wiedergegeben sind (Vajna et al. 2007).

Trotz der Möglichkeit der 3D-CAD-Modellübernahme für Simulationszwecke über neutrale Schnittstellen zeigt die Praxiserfahrung jedoch, dass eine aufwändige Reparaturarbeit – aufgrund von Toleranzen- und Genauigkeitsproblemen – notwendig ist. Auch die Geometrien für Produktvarianten können nicht direkt übernommen werden, für jede 3D-CAD-Modellvariante muss ein separates Berechnungsmodell aufbereitet werden. Weiterhin kann die in einem FEM-System optimierte Geometrie ins 3D-CAD-System nicht automatisch überführt werden, da eine funktionierende Rückkopplung vom FEM-Programm zum 3D-CAD-System nicht existiert.

Abbildung 7.15 zeigt eine FEM-Steifigkeitsoptimierung zur Einführung eines ACW-Spulkopfes für eine Textilmaschine der Firma Oerlikon Barmag, einer Zweigniederlassung der Oerlikon Textile GmbH & Co. KG, Remscheid. Die Firma stellt Spinnanlagen her,



**Abb. 7.14** Ablauf einer FEM-Analyse (nach Vajna et al. 2007)

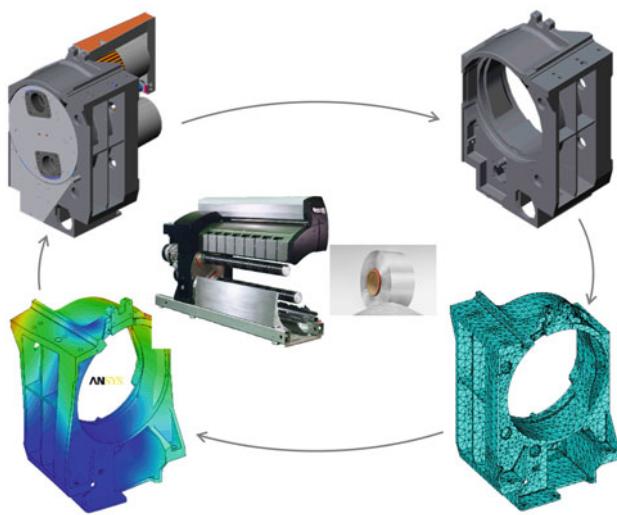
auf denen aus einem Polymergranulat – beispielsweise Polyester – ein Chemiefasergarn gesponnen und zu einer sog. Kreuzspule aufgewickelt wird. Die Kreuzspule entsteht in dem in Abb. 7.15 in der Mitte dargestellten Spulkopf.

Das Wickeln einer Kreuzspule mit typischerweise 440 mm Durchmesser, 120 mm Breite und einer Masse von 15 kg ist ein äußerst komplizierter und sensibler Prozess, bei dem 9.000 km Garn so gleichmäßig abgelegt werden müssen, dass sich eine nahezu idealzylindrische Kreuzspule ergibt, die dann im nachfolgenden sog. Texturierprozess ohne Reißen des Garnes «über Kopf» – d. h. in Richtung der Spulenlängsachse – abgezogen werden kann.

Auf einem Spulkopf werden typischerweise gleichzeitig zehn Kreuzspulen mit einer Gesamtmasse von 150 kg gewickelt, die hintereinander auf dem einseitig im Gehäuse des Spulkopfes angeflanschten Spuldorn angeordnet sind und so ein Einspannmoment von ca. 1.500 Nm erzeugen.

Die hohen Lasten, die Sensitivität des Wickelprozesses und die Länge des Spuldornes von 1.500 mm erfordern die genaue Kenntnis und Optimierung der Deformation des gegossenen Gehäuses. Die gesamte Konstruktion des Spulkopfes ist an diesem Gehäuse auf-

**Abb. 7.15** Steifigkeitsoptimierung mit FEM zur Einführung eines ACW-Spulkopfes für eine Textilmaschine (Firma Oerlikon Barmag, Remscheid)



gehängt. Das Beheben von Defiziten im Deformationsverhalten des Gehäuses, die erst beim Test des ersten Prototypen zu erkennen sind, würde den gesamten Aufbau des Spulkopfes beeinflussen und damit die Entwicklungszeit verlängern und -kosten dramatisch erhöhen.

Bei der Entwicklung der ACW-Baureihe (ACW = Advanced Craft Winder) wurden daher umfangreiche theoretische Deformationsanalysen und -optimierungen am Gehäuse durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten mit dem CAD-Programm SolidWorks und dem Finite-Elemente-Programm ANSYS, die durch eine Schnittstelle miteinander gekoppelt waren.

Der erste Entwurf des Gehäuses wurde von SolidWorks nach ANSYS übergeben. Das Volumenmodell wurde vernetzt, mit Werkstoffeigenschaften, Randbedingungen und Belastungen versehen und dann das Deformationsfeld berechnet. Die Analyse dieses Deformationsfeldes führte zu einem ersten Änderungsvorschlag für das Gehäuse. Diese vorgeschlagenen Änderungen wurden dann unter Berücksichtigung der gießtechnischen Restriktionen und weiterer, aus der Konstruktion des Spulkopfes und dem Wickelprozess resultierender Randbedingungen, in einer ersten überarbeiteten Version des Gehäuses im CAD-System SolidWorks umgesetzt und dann wieder an das FEM-Programm ANSYS übergeben, gerechnet und analysiert. Diese Optimierungsschleife wurde so oft durchlaufen, bis ein den Ansprüchen hinsichtlich des Deformationsverhaltens genügendes Gehäuse gefunden wurde.

Dieser Optimierungsprozess hätte auch automatisch vom FEM-System durchgeführt und die neue Version des Gehäuses über die bidirektionale Schnittstelle ans CAD-System zurückgegeben werden können. Es ist aber bei jeder Berechnung neu zu entscheiden, welcher der beiden Wege gegangen werden soll. Im vorliegenden Fall sehr komplexer, nur bedingt mathematisch formulierbarer Randbedingungen und Zielfunktionen spielte die

Erfahrung aus Berechnung und Konstruktion eine entscheidende Rolle, um die richtige Vorgehensweise zu finden.

Das von der Berechnung prognostizierte Deformationsverhalten des Gehäuses wurde dann später am ersten Prototypen durch Messungen auf einer 3D-Messmaschine bestätigt. Die dargestellten Berechnungen ermöglichen die Entwicklung eines steifigkeitsoptimierten Gehäuses und damit die verlässliche Festlegung der Anschlussmaße zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses und trugen damit maßgeblich zur schnellen und kostengünstigen Entwicklung des Produkts bei.

Typische Aufgabenstellungen für Strukturanalysen mittels FEM sind u. a.:

- lineare und nichtlineare Berechnungen und Führung der entsprechenden Festigkeitsnachweise,
- Untersuchung hinsichtlich Lebensdauer bzw. Ermüdung,
- lineare und nichtlineare Berechnungen der Stabilität und Beulverhalten von mechanischen Strukturen,
- stationäre und instationäre Wärmestrahlung, -leitung und -konvektion basierend auf Temperatur als Last,
- lineare und nichtlineare Berechnungen, Modalanalyse, Frequenzganganalyse, Spektralanalyse, transiente Analysen,
- Berechnung und Simulation von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen,
- Simulation von Dichtungen, Formteilen und Elastomeren,
- Simulation von Kriechverhalten und Aufschlagversuchen und
- optimale Verteilung der Masse eines Bauteils innerhalb eines festgelegten Raums (Topologie-Optimierung).

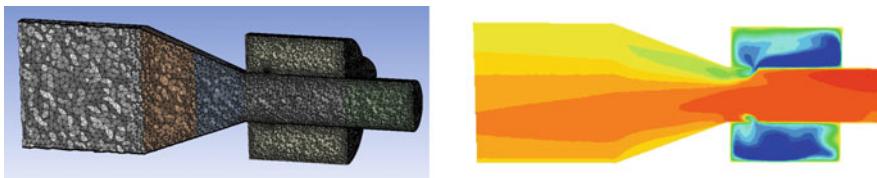
### 7.2.3.2 Strömungssimulation – CFD

Die numerische Strömungsmechanik (Englisch: computational fluid dynamics, CFD) ist eine etablierte Methode der Strömungsmechanik mit dem Ziel, strömungsmechanische Probleme approximativ mit numerischen Methoden zu lösen. Eine wichtige Grundlage bilden die Erhaltungssätze der Physik für Masse, Impuls und Energie (Navier-Stokes-Gleichungen). Ergänzend werden aber auch empirische Ansätze, z. B. für Turbulenz, Wärmeübertragung zu Oberflächen usw., verwendet.

Mit Hilfe der CFD-Simulation lassen sich fluidische Phänomene, die stark durch die Geometrie der Bauteile bestimmt sind, genau berechnen. Die CFD-Modellierung kann dabei räumlich 2- oder 3-dimensional sowie zeitlich stationär oder instationär erfolgen.

Die CFD-Simulation umfasst u. a. folgende Gebiete:

- stationäre und instationäre Strömungen mit und ohne Wärmeübergang,
- laminare und turbulente Strömungen einschließlich Modellierung verschiedener Turbulenzmodelle,
- inkompressible und kompressible Strömungen bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten bis hin zu Überschall,



**Abb. 7.16** Gasmischungssimulation mit dem CFD-System FLUENT (mit freundlicher Unterstützung der Vaillant Group, Remscheid)

- Mehrphasenströmungen: Einspritzvorgänge mit Gas- und Tropfenphase einschließlich Verdampfung und
- Modellierung der Strömung zäher Medien (Einspritz- und Füllvorgang von Gussformen für Elastomere und Kunststoffe).

Beispiele für praktische Anwendungsgebiete der CFD-Methode finden sich in:

- Strömung in aerodynamischen und Klimawindkanälen, von Abkühlungs- und Aufheizungsvorgängen in Klimawindkanälen, Mehrphasenströmung in Icing-Windkanälen für den Anlagenbau und Prüfstände,
- Fahrzeugumströmung, Kraftstoffeinspritzung, motorische Verbrennung, Eindüsung von Harnstoffpartikel in den Abgasstrom zur Abgasreinigung in der Fahrzeugtechnik,
- Tragflächenumströmung mit Strömungsablösung für die Raum- und Luftfahrttechnik,
- Umströmung von Leit- und Laufradschaufeln für Strömungsmaschinen und
- Erfassung von Luftströmungen und die Temperaturverteilung innerhalb eines Raumes.

Abbildung 7.16 zeigt eine Vorrichtung zur Gasmischung in einem Heizgerät. Das linke Bild zeigt ein Tetraedernetz mit Randschichtzellen. Auf dem rechten Bild ist der Temperaturverlauf der Gase bzw. Gasmischung zu sehen. Je dunkler die Farbe desto heißer ist das Gas.

### 7.2.3.3 Systemsimulation

Komplexe Produkte bestehen in der Regel aus mehreren Modulen, Baugruppen und Einzelteilen. Das Verhalten des gesamten Systems wird durch die Wechselwirkung der einzelnen Systemkomponenten bestimmt. Das Verständnis des gesamten Systemverhaltens kann in der Realität schwierig sein aufgrund von erhöhter Integrationsdichte, physikalischen Wechselwirkungen, zunehmender Integration von Sensoren und Aktuatoren und erhöhter thermo-mechanischer Lasten. Die Systemsimulation bietet hierfür sinnvolle Unterstützung.

Bei der Systemsimulation wird das Gesamtsystem in einzelne Komponenten zerlegt. Jede Komponente wird mit ihrem physikalischen Verhalten in einem eigenen Simulationsmodell beschrieben. Die einzelnen Modelle werden dann miteinander kombiniert, wodurch komplexere Systeme aufgebaut werden können, deren Verhalten insgesamt analysiert werden kann. Dabei werden die verschiedenen physikalischen Effekte gleichzeitig berechnet.

Weiterhin können Layout-Parameter optimiert oder Störfälle nachgebildet werden. Die einmal formulierten Simulationsmodelle der einzelnen Komponenten lassen sich beliebig wiederverwenden und können in einer Standard-Bibliothek zur späteren Nutzung abgelegt werden.

Zur Darstellung von Simulationsmodellen bieten einige Systeme grafische Oberflächen, indem mittels des Bildschirmzeigers Blöcke aus einer Block-Bibliothek geholt und Signalleitungen zwischen ihnen gelegt werden können, vordefinierte Blöcke werden auch angeboten.

### 7.2.3.4 Mehrkörpersimulation (MKS)

Um das Bewegungsverhalten komplexer Systeme zu untersuchen, die aus einer Vielzahl gekoppelter beweglicher Teile bestehen (wie Fahrzeuge, Maschinen oder Anlagen), wird die Simulation von Mehrkörpersystemen (MKS) eingesetzt. Das Anwendungsspektrum von MKS reicht von der Überprüfung des Bewegungsverhaltens einzelner, aus wenigen Bauteilen bestehender Baugruppen über die Identifikation von Kollisionsproblemen durch Bauteilbewegungen bis hin zum Bewegungsverhalten eines Gesamtsystems. Ferner können mittels MKS-Simulation Kräfte und Momente bestimmt werden, die durch Bewegungen auf das System einwirken. Die Gestaltdaten können ebenfalls in der Regel aus einem 3D-CAD-System übernommen werden bzw. werden als vereinfachte 3D-Modelle mit Hilfe eines im MKS-System integrierten Volumenmodellierers erzeugt. Einige 3D-CAD-Systeme verfügen auch über integrierte Module für MKS-Untersuchungen (VDI Richtlinie 2206 2004).

Abbildung 7.17 zeigt ein MKS-Modell für ein Gesamtfahrzeug bei der Überfahrt einer Schlagleiste. Zur Komfortbeurteilung und Ermittlung der auf die Bauteile wirkenden Lasten werden u. a. die Längskräfte auf den Reifen während der Schlagleistenüberfahrt benötigt. Der Graph zeigt die Reifenkraft in Fahrtrichtung.

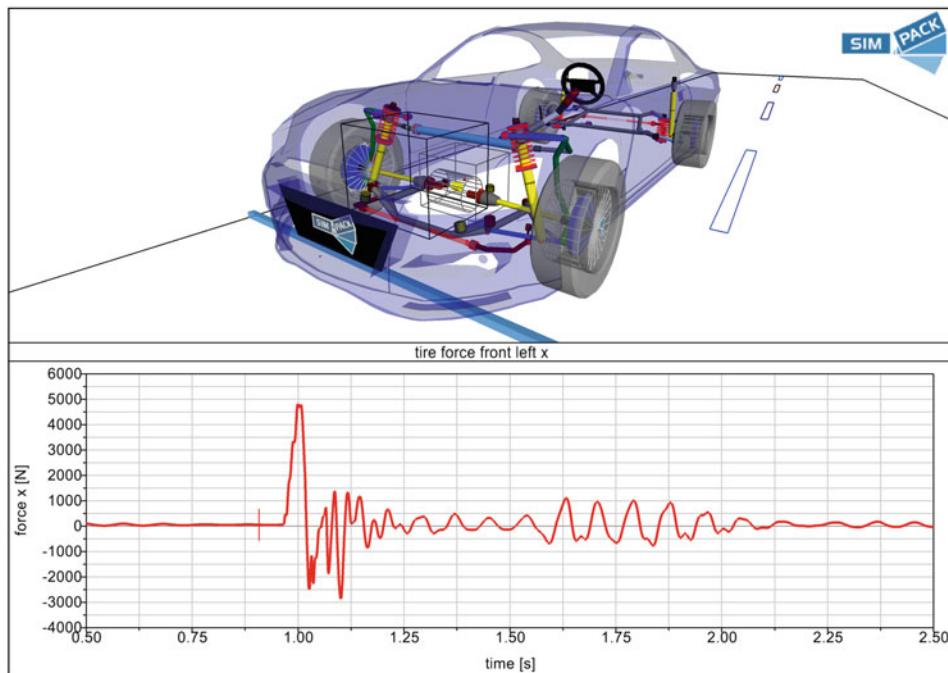
Deutlich zu erkennen sind die Spitzenlasten sowie die auftretenden Längsschwingungen.

## 7.2.4 Produktdatenmanagement (PDM)

### 7.2.4.1 Grundlagen und Prinzipien von PDM-Systemen

Während der Produktentwicklung werden unterschiedliche Datentypen erzeugt, deren Menge in den letzten Jahren aufgrund der vielfältigen Applikationssysteme dramatisch zugenommen hat. Zudem erfordert die steigende Produktkomplexität einen höheren Grad an Vernetzung dieser Daten. Werden Produktdaten von mehreren Personen in einer verteilten Entwicklungsumgebung bearbeitet, muss der Zugriff auf diese Daten durch dafür geeignete Systeme gesteuert werden. In der Regel heißen diese Systeme Produktdatenmanagement-Systeme (PDM) oder Engineering Data Management (EDM).

PDM-Systeme basieren auf Datenbanken, in denen neben dem Originalformat eines Files, wie z. B. 3D-CAD-Modell, 2D-CAD-Zeichnung, Word-Dokument, usw., auch beschreibende Informationen zur Datei hinterlegt werden. Beschreibende Informationen



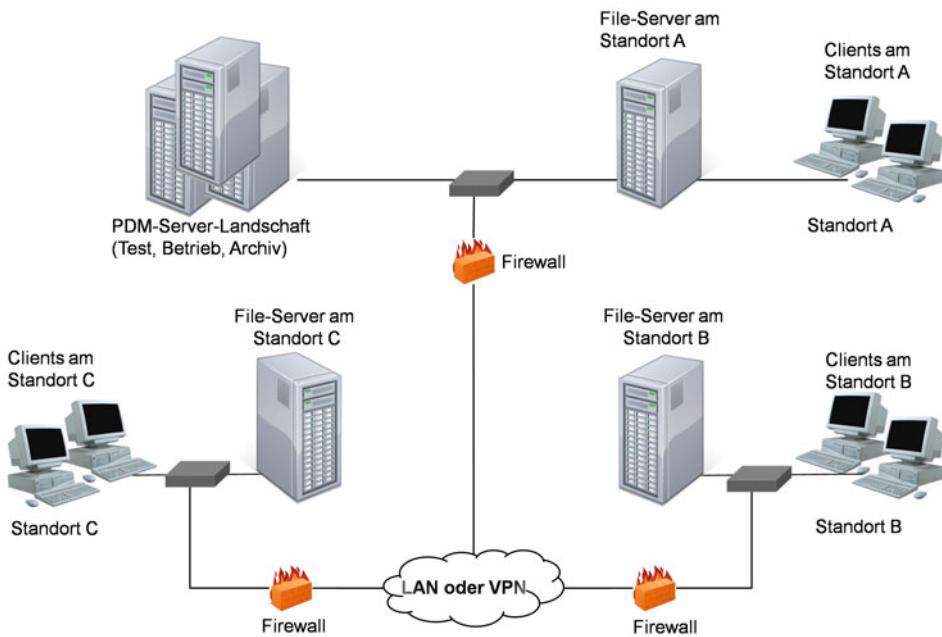
**Abb. 7.17** MKS-Modell für ein Gesamtfahrzeug bei der Überfahrt einer Schlagleiste (mit freundlicher Unterstützung des Fraunhofer ITWM und der SIMPACK AG)

(Metadaten) sind z. B. Teilenummern, Version, Erstellungs- und Freigabedatum, Gültigkeitsstatus, Ersteller usw. Die Metadaten werden teils durch das PDM-System hinzugefügt und teils durch den Anwender ergänzt. Über solche Metadaten wird eine gezielte Suche nach Informationen und/oder Datensätzen im System erleichtert, was zur Effizienzsteigerung bei der Informationsbeschaffung in der Produktentwicklung führt.

PDM-Systeme basieren grundsätzlich auf Client/Server-Rechnerarchitekturen, wobei die Datenspeicherung im zentralen Server erfolgt (s. Abb. 7.18). Die Client-Rechner sind mit dem Server über Netzwerke verbunden, die unterschiedliche Übertragungskapazitäten haben. Für die temporäre Bearbeitung der Daten bieten die Systeme einen sog. „Work Space“, indem die Daten vom zentralen Server ausgecheckt, über das Netzwerk übertragen und auf dem lokalen Arbeitsplatzrechner gespeichert werden. Nach der Bearbeitung der Daten werden sie wieder auf dem Server abgelegt (eingecheckt).

3D-CAD-Daten sind in der Regel große Files, deren Übertragung vom Client zum Server oder umgekehrt abhängig von der Netzwerkkapazität und dem generellen Daten-Traffic lange Zeit in Anspruch nehmen kann. Erhöht man die Netzwerkkapazitäten, verursacht man damit höhere laufende Kosten, die die gesamten Produktkosten negativ beeinflussen.

Deshalb spielt die Datenreplikation bei PDM-Systemen eine wichtige Rolle, wenn mehrere Standorte verbunden werden sollen. Es handelt sich dabei um die gezielte verteilte

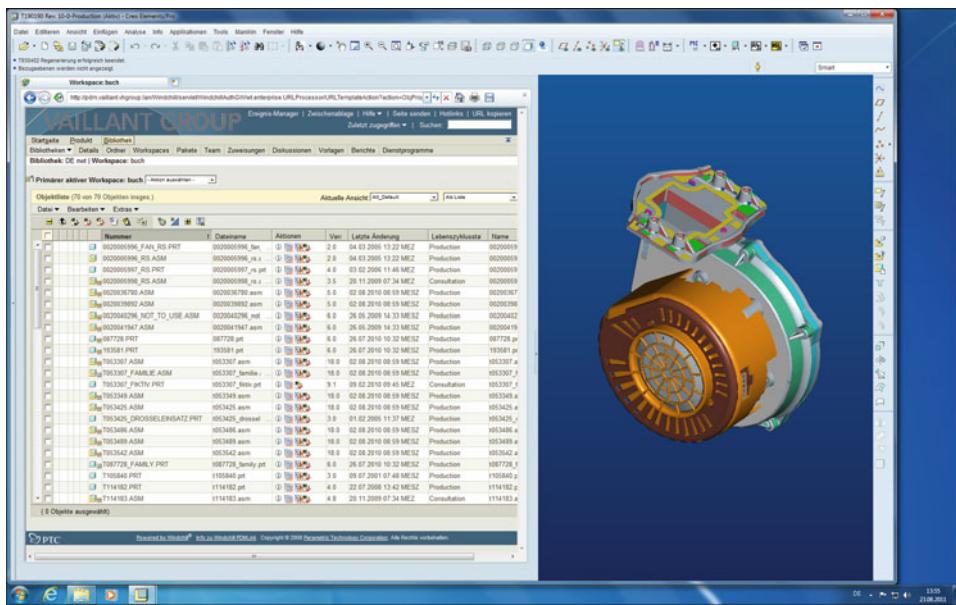


**Abb. 7.18** Typische IT-Infrastruktur für ein PDM-System

Speicherung von bestimmten Produktdaten auf lokale Server. Die Verteilung der Daten wird parallel zur zentralen Ablage durchgeführt. Werden Daten an einem Standort benötigt, werden diese vom lokalen Server über lokale Netzwerke (LAN), die in der Regel sehr hohe Kapazitäten haben, zur Verfügung gestellt. Ändert man die lokalen Daten, erfolgt ein Abgleich mit der zentralen Ablage, sodass die Datenkonsistenz sichergestellt ist. Der Abgleich kann manuell oder automatisch gesteuert werden.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten für die Verwaltung der Produktdaten (VDI-Richtlinie 2219 2002). Bei der ersten Alternative erfolgen das Management der Daten in der Regel in einem CAD-nahen PDM-System. Das Gesamtsystem wird von einem Hersteller angeboten und ist gut aufeinander abgestimmt. Unter anderem hat diese Methode den Vorteil, dass System-Updates meistens parallel erfolgen und nötige Systemabstimmungen vom Hersteller übernommen werden. Nachteile ergeben sich bei der Verwaltung von Fremddaten, die in den meisten Fällen nur bedingt möglich ist.

Eine höhere Flexibilität bietet der Ansatz von übergeordneten PDM-Systemen, die von bestimmten CAD-Systemen nicht abhängig sind (s. Abb. 7.19). Diese Systeme bieten offene Schnittstellen zu anderen CAD-Systemen, zu PPS-Systemen sowie zu Office-Applikationen. Solche Systeme bieten in der Regel umfangreiche Funktionalitäten und Prozessmodule zum Management von Produktdaten. Die Integration erfordert jedoch umfassendere Anpassungen an die betrieblichen Bedürfnisse, die zu längeren und aufwändigeren Einführungsphasen sowie zu höheren Kosten führen können (VDI-Richtlinie 2219 2002).



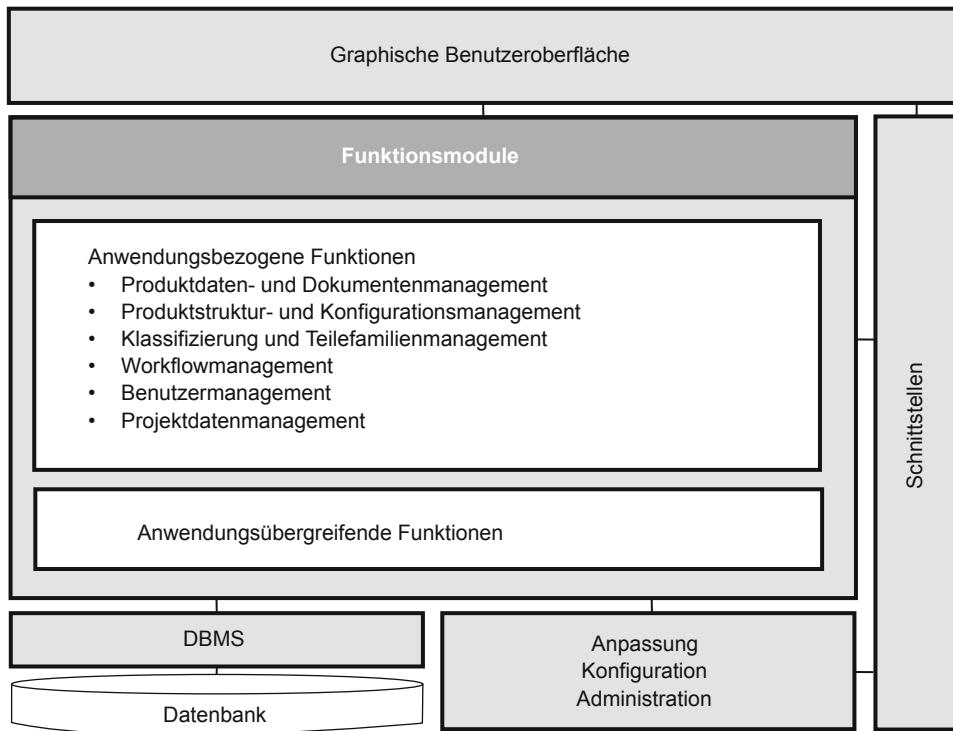
**Abb. 7.19** PDM-System mit einer Schnittstelle zum 3D-CAD-System Pro/ENGINEER (Windchill PDMLink of Parametric Technology Co.)

Schnittstellenanpassungen aufgrund von Updates auf der PDM-Seite oder auf der Seite der gekoppelten Applikationen sind in der Regel notwendig und führen zu zusätzlichen Kosten. Die VDI-Richtlinie 2219 liefert eine zusammenfassende Dokumentation über PDM-Systeme und ist für eine weitere Detaillierung empfehlenswert.

PDM-Systeme sind üblicherweise durch einen modularen Aufbau ihrer einzelnen Systemkomponenten gekennzeichnet. Die Basis für PDM-Systeme bilden kommerziell verfügbare, überwiegend rationale, teilweise aber objektorientierte Datenbankmanagementsysteme. Daneben gibt es Werkzeuge zur Systemanpassung und Schnittstellen zum Datenaustausch mit anderen Systemen. Eine allgemeine PDM-Systemarchitektur ist in Abb. 7.20 dargestellt.

### 7.2.4.2 Übersicht über PDM-Funktionalitäten

*Check-in und Check-out* Das Ziel der Check-in- und Check-out-Funktion im PDM-System ist die Sicherstellung der konfliktfreien Nutzung von Produktdaten durch die Mitglieder eines Projektteams. Beim ersten Check-in wird eine Datei im PDM-System gespeichert. Mit der Funktion Check-out lassen sich Objekte von einem Arbeitsbereich in einen anderen kopieren. Der Bearbeitungszustand wird dabei hoch gezählt. Nach dem Check-out haben die Anwender nur noch einen lesenden Zugriff auf das Originalobjekt. Dieses soll die konfliktfreie Bearbeitung von PDM-Objekten sicherstellen. Beim Auschecken von PDM-Objekten muss der Nutzer in der Regel entscheiden können, ob auch andere verknüpfte Objekte mit ausgecheckt werden sollen oder nicht.

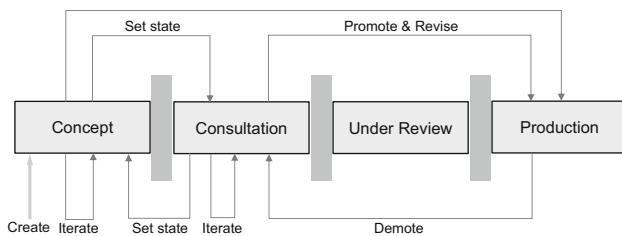


**Abb. 7.20** PDM-Systemarchitektur (nach Vajna et al. 2007)

Ausgecheckte Objekte haben eine Beziehung zum Original und werden durch das PDM-System automatisch gekennzeichnet, so dass andere Anwender über das ausgecheckte Objekt informiert werden. Nach einem Check-in haben andere Benutzer wieder die Möglichkeit, einen Check-out der Datei vorzunehmen, wenn sie die Berechtigungen dafür haben.

Nach der Freigabe werden PDM-Objekte eingefroren. Eingefrorene Objekte lassen sich nur zum Ändern auschecken. Dabei wird eine neue Version gemäß des gültigen Prozesses zum Änderungsmanagement erzeugt.

**Viewing und Markup** Viewing-Software muss nicht ein Bestandteil eines PDM-Systems sein, ist aber eine wichtige Komponente jeder PDM-Lösung. Der Funktionsumfang eines Viewers reicht von der einfachen Visualisierung von Image-Files bis zu komplexen Vorgängen. Dabei werden nicht nur einfache Image-Files von Dokumenten oder Zeichnungen visualisiert, sondern auch 3D-CAD-Daten aus unterschiedlichen Systemen. Einige Viewer-Systeme verfügen über Funktionalitäten zum Markieren (Redlining), Drehen, Messen, Schneiden und Vergleichen von 3D-Modellen, zum Zusammenbauen und Aus-



**Abb. 7.21** Beispiel für einen Freigabeprozess in einem PDM-System

einandernehmen von Teilen und Baugruppen. In einem Viewer können auch Daten zu unterschiedlichen Datenformaten konvertiert werden.

Die Visualisierung der Daten durch eine Viewer-Software erfolgt ohne das verwendete Applikationssystem. Auf diese Weise können große Mengen an Datentypen während des Produktentstehungsprozesses auf effiziente Weise unternehmensweit genutzt werden, ohne die Originalapplikation zu installieren. Interessant scheint dieser Aspekt für die Bereiche Einkauf, Marketing, Fertigung, Ersatzteile usw., aber auch für das Management in der Produktentwicklung. Diese Bereiche haben in der Regel keinen Zugang zu CAx-Applikationen (Native Files).

Mit der Funktion Redlining können Anmerkungen, Ergänzungen und Korrekturen in einem elektronischen Dokument oder an einem 3D-CAD-Modell vorgenommen werden, ohne das Original physisch zu verändern. Die eingebrachten Änderungen lassen sich wie transparente Folien über die Bildvorlage legen (Schöttner 1999).

*Workflow und Prozessmanagement* Mit Hilfe der Workflow-Komponente im PDM-System lassen sich die Arbeitsabläufe eines Geschäftsprozesses auf ein Prozessmodell im Rechner abbilden. Der Arbeitsablauf betont dabei die operativ-technische Sicht auf die Prozesse, beispielsweise zur Erstellung, Freigabe und Archivierung von Produktdaten (s. Abb. 7.21).

Der Workflow ist je nach Komplexitätsgrad des zu repräsentierenden Geschäftsprozesses mehr oder weniger stark strukturiert. Die Strukturelemente sind die Prozessschritte bzw. -aktivitäten. Prozessmanagement koordiniert und kontrolliert die Vorgänge, mit denen die Arbeitsergebnisse in der Produktentwicklung entstehen. Mitarbeiter, die in den Vorgang involviert sind, erhalten vom PDM-System eine Benachrichtigung, entweder direkt im System oder per E-Mail. Nach der Ausführung eines Prozessschrittes sorgt das PDM-System dafür, dass die nächsten Aufgaben dem Prozessmodell entsprechend an die zuständigen Personen weitergeleitet werden. Es wird sichergestellt, dass nur autorisierte Personen Zugriff auf die im Workflow befindlichen Objekte haben.

Dabei müssen die Anwender im System hinterlegt werden. Jedem Anwender ist eine Rolle zugewiesen. Typische Rollen sind z. B. Ersteller, Freigeber und Administrator. Ein Ersteller kann im System bestimmte Daten erzeugen und ändern, ein Freigeber kann diese Daten

freigeben. Ein Administrator ist für die Gestaltung und Überwachung der Systemprozesse verantwortlich und verfügt in der Regel über Sonderrechte im PDM-System.

*Dokumentenmanagement* In einem PDM-System dient das Dokumentenmanagement zur Organisation der Erstellung, der Überarbeitung bzw. des Änderns, der Überwachung, der Verteilung und der Archivierung von Dokumenten über ihren gesamten Lebenszyklus. Dafür stellen PDM-Systeme Kontroll-, Steuerungs- und Weiterleitungsfunktionen zur Verfügung. Dokumente sind alle Objekte auf Papier oder in elektronischer Form, die Informationen für die jeweiligen betrieblichen Prozesse zur Verfügung stellen. Typische Beispiele für Dokumente sind Zeichnungen bzw. Fertigungsunterlagen, technische Spezifikationen, FMEA-Unterlagen, Bedienungs- und Installationsanleitungen. Die Funktionalitäten zum Dokumentenmanagement umfassen die Erstellung und Ablage von Dokumenten, Check-in/Check-out, Öffnen und Visualisieren, Klassifizierung, Vergabe von Suchkriterien (durch das System oder durch den Anwender), Versionieren/Historie, Weiterleitung, Zugriffskontrolle, und die Vergabe von Notizen und Stempelfunktion.

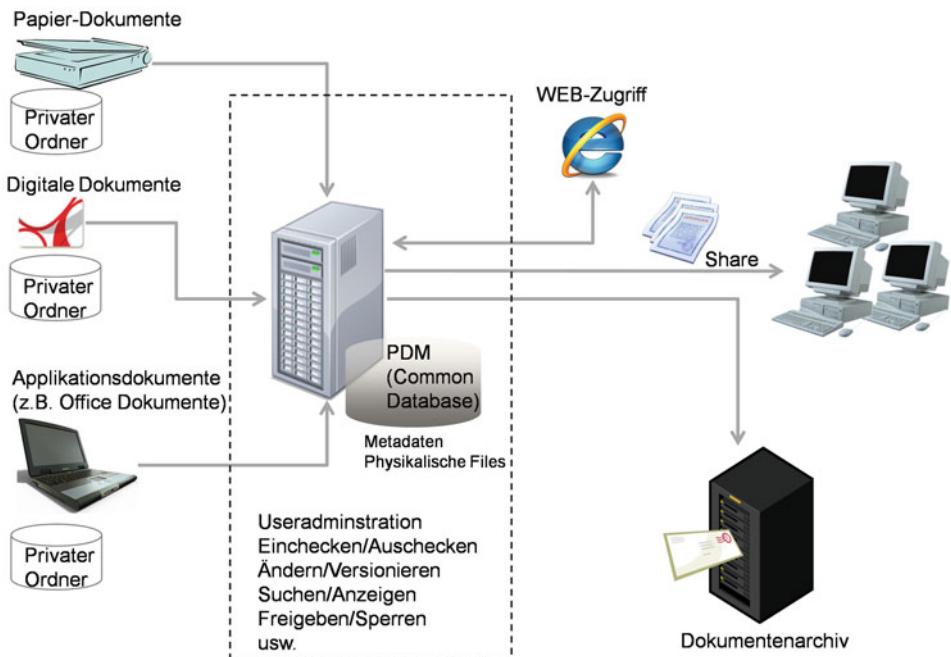
Neben der Beschleunigung der Informationsbeschaffung durch leistungsstarke Suchalgorithmen (strukturierte und Volltextsuche) gewährleistet das Dokumentenmanagement u. a. die bedarfsgerechte Bereitstellung von aktuellen Dokumenten an allen Arbeitsplätzen mit den abgestuften Zugriffsrechten der Mitarbeiter (Vertraulichkeitsgrad).

Papierunterlagen können eingescannt und ins PDM-System abgelegt werden, und digitale Files wie PDFs werden direkt ins PDM-System übernommen (s. Abb. 7.22). Bietet das PDM-System eine Schnittstelle zu einer bestimmten Applikation (z. B. zur Office Applikation: Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Präsentationen), so kann das Nativformat aus dieser Applikation im PDM-System im vollen Umfang verwaltet werden.

*Produktstruktur- und Konfigurations-Management* In einer Produktstruktur werden die Beziehungen (gehört zu oder besteht aus) zwischen den Einzelteilen und Baugruppen in einer hierarchischen Struktur aufgebaut. Den Beziehungen innerhalb der Produktstruktur können dabei auch Informationen, wie beispielsweise Menge oder Einbauort, zugewiesen werden. Der Aufbau der Produktstrukturen kann mehrere Sichten beinhalten: Die funktionale Sicht für die Konstruktion, die Fertigungssicht für die Arbeitsplanung, die Vertriebssicht des Verkaufs, die Ersatzteilsicht usw. Dadurch können alle Informationen zum Produkt über die Produktstruktur zugänglich gemacht werden.

Die ISO 1007 „Qualitätssicherung, Leitfaden für Konfigurationsmanagement“ definiert Konfigurationsmanagement als technische und organisatorische Maßnahmen zur Konfigurationsidentifizierung, Konfigurationsüberwachung, Konfigurationsbuchführung, Konfigurationsauditierung.

Der in Amerika gültige Industriestandard EIA-649 definiert Konfigurationsmanagement etwas verständlicher als das Verfahren zur Herbeiführung und ständiger Sicherstellung der Übereinstimmung der Leistungs-, Funktions- und physischen Charakteristiken eines



**Abb. 7.22** Schema des Dokumentenmanagements im PDM

Produkts mit den zugehörigen Anforderungen, den Ausführungen, den Ausführungsunterlagen und den für den Betrieb erforderlichen Informationen während des gesamten Lebenszyklus des Produkts.

Ziel des Konfigurations-Managements ist es, den Grad der Erfüllung physischer und funktionaler Anforderungen an eine Konfigurationseinheit zu dokumentieren und diesbezüglich volle Transparenz herzustellen. Diese soll zudem dazu führen, dass jeder an einer Konfigurationseinheit Interessierte die richtige und zutreffende Dokumentation verwendet. Eine lückenlose Dokumentation der Konfiguration entlang der Produktlebenszyklen ist dabei sichergestellt (Planung, Konstruktion, Fertigung, Service usw.).

Leistungsfähige PDM-Systeme bieten entsprechende Funktionalitäten zur Erstellung und zum Management von Produktstrukturen und -konfigurationen. Diese sind insbesondere für die Bereiche Luftfahrtindustrie, Automobilbau und Anlagenbau von großem Interesse.

**Berechtigungsmanagement** In einem PDM-System ist ein wichtiger Teil des Unternehmenswissens gespeichert. Aus diesem Grund muss sichergestellt sein, dass nur berechtigte Personen Zugang zum System haben. Es handelt sich dabei u. a. um das Einsehen, Bearbeiten, Ändern oder Freigeben von Produktdaten im PDM-System. Durch ein entsprechendes Berechtigungskonzept wird festgelegt, wer welche Aufgaben im System ausführen darf. Konfliktsituationen bei der Bearbeitung/Änderung von Daten verhindert das PDM-System

durch geeignete Regeln beim Check-In/Check-Out. Zugleich ist sichergestellt, dass immer der aktuelle Stand des Files erkennbar ist. Zudem ist ein gemeinsamer Zugriff auf die Daten während der Bearbeitung oder nach der Freigabe möglich.

In einem Anwenderprofil lassen sich bestimmte Attribute wie Name, Abteilung, Funktion, Standort, Berechtigung, E-Mail-Adresse usw. eintragen. Zum Arbeiten mit dem PDM-System benötigt der Anwender entweder eine persönliche Arbeitsumgebung (z. B. Workspace) oder die Berechtigung für Objekte in einem öffentlichen Arbeitsbereich des PDM-Systems.

Neben Usern werden auch Gruppen und Rollen im PDM-System definiert, denen ein bestimmter Berechtigungsumfang zugeordnet werden kann. Die Zuordnung von PDM-Anwendern zu Gruppen oder Rollen übernimmt normalerweise ein Administrator. Das gleiche gilt für das Einrichten von Arbeitsbereichen für neue PDM-Anwender.

Auf weitere Beschreibungen von PDM-Funktionalitäten wird hier verzichtet und auf die weiterführende Literatur hingewiesen (Schöttner 1999; Feldhusen und Gebhardt 2008; Lashin 2009; Stark 2005; Eigner und Stelzer 2001).

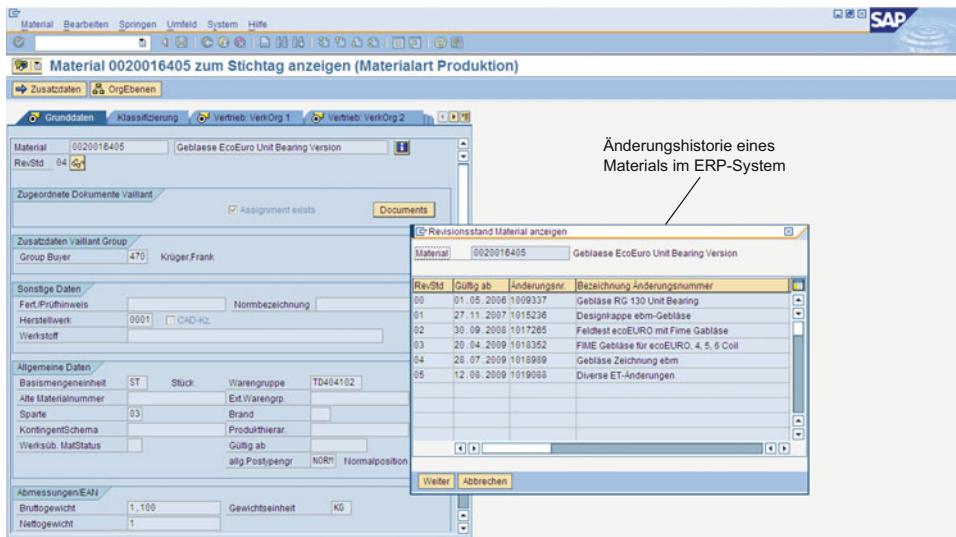
## 7.2.5 Enterprise Resource Planning (ERP)

Der Begriff ERP steht für Enterprise Resources Planning. ERP-Systeme – heutige Generation der PPS-Systeme – werden zur Unterstützung von Produktionsprozessen, aber auch in den Bereichen Einkauf, Finanzwesen/Controlling, Personalwirtschaft, Vertrieb und Service/Instandhaltung eingesetzt. ERP-Systeme sind in Standard-Modulen vorgefertigt erhältlich. Für spezielle Anwendungen können diese Standard-Module zumeist durch eigene Programmierung oder durch die Verwendung von Zusatzmodulen weiterentwickelt werden. Neben SAP AG und Oracle existieren verschiedene Hersteller von ERP-Systemen.

ERP-Systeme spielen die zentrale Rolle bei der Auftragsabwicklung in einem Fertigungsunternehmen. Sie sollen sicherstellen, dass die beauftragten Produkte zum Wunschtermin, in der richtigen Menge und Qualität und zu den vorgegebenen Kosten und Spezifikationen gefertigt werden. Nachfolgend werden nur einige ERP-Funktionalitäten, die für die Produktentwicklung relevant sind, kurz beschrieben.

Im Rahmen der Aktivitäten zur Produktionsplanung und -steuerung werden in einem ERP-System Materialien und Stücklisten eingepflegt, die die Grundlage für die Auftragsabwicklung in einem Fertigungsunternehmen bilden. Oft wird diese Aufgabe durch die Konstruktionsabteilung wahrgenommen. Der Begriff „Material“ in einem PPS/ERP-System bezeichnet einen Stoff oder einen Gegenstand, mit dem gehandelt wird oder der bei der Fertigung eingesetzt, verbraucht oder erzeugt wird. Ein Material im ERP-System kann auch eine Dienstleistung darstellen. Einzelteile, Baugruppen oder Endprodukte werden somit in einem ERP-System in der Regel als „Materialien“ bezeichnet.

Zu einem Material werden verschiedene Informationssichten im Materialstammsatz eingepflegt. Diese Informationen haben beschreibenden Charakter wie Größe, Abmessung, Gewicht, Werkszuordnung usw. Andere Informationen haben eine Steuerungsfunktion,



**Abb. 7.23** Grunddatensicht und Änderungshistorie eines Materials in einem ERP-System (System SAP)

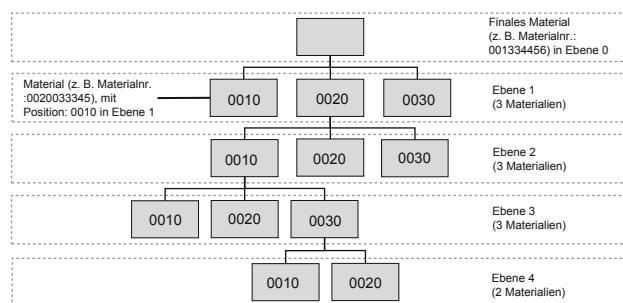
wie Materialart und Branche. Neben diesen Daten, die direkt vom ERP-Benutzer gepflegt werden, gibt es weitere Daten, die vom System automatisch fortgeschrieben werden.

Typische Sichten eines Materialstammes für ein Fertigungsunternehmen sind Grunddatensichten, allgemeine Sicht für Werksdaten/Lagerung, Dispositionssichten, Einkaufssichten, Buchhaltungssichten und Vertriebssichten. Die Informationen in den verschiedenen Sichten werden von den zuständigen Abteilungen eingepflegt und verarbeitet.

Informationen über die Änderungshistorie eines Materials kann auch im Materialstammsatz abgerufen werden (s. Abb. 7.23).

Materialien werden im ERP-System zu Stücklisten zusammengefasst, im Englischen ist die Stückliste unter dem Begriff „BOM“ bekannt (BOM: Bill of Materials). Die Stückliste ist somit eine strukturierte Anordnung von Objekten und deren Menge (s. Abb. 7.23 und 7.24). Eine Materialstückliste beinhaltet unternehmensspezifisch die strukturierte Anordnung von Werkstoffen, Teilen oder Baugruppen (mit Angabe der Stückzahlen als vordefinierte Struktur), die zur Herstellung eines Produktes benötigt werden. Die Stückliste ordnet die Teile/Baugruppen eines Produktes nach deren strukturellen Eigenschaften, wobei die Funktion keine Rolle spielt. Stücklisteninformationen gehören zu den wichtigsten Datenstrukturen für ein Fertigungsunternehmen. Sie dienen dazu, die richtigen Materialien zu bestellen und/oder dem Lager zu entnehmen, um ein bestimmtes Produkt herzustellen. Die Stückliste ist entscheidend für die Bedarfsplanung für Personal, Maschinen, Menge der Kaufteile und Eigenfertigungsteile, Lagerung und Zeitbedarf bei der Abwicklung von Fertigungsaufträgen.

**Abb. 7.24** Schematische Darstellung einer Stückliste mit mehreren Ebenen



In Verbindung mit der Stückliste beschreibt ein Arbeitsplan den Produktionsablauf in Bezug auf die einzelnen Ablaufabschnitte mit den entsprechenden Vorgabezeiten (Rüstzeit, Ausführungszeit usw.). Eine Stücklistenposition wird dabei einer bestimmten Arbeitsposition zugeordnet. Der umgekehrte Weg von der Stücklistenposition zum Endprodukt wird in ERP-Systemen als Teileverwendungsnachweis bezeichnet.

Es gibt verschiedene Arten von Stücklisten, s. Abb. 7.24 und 7.25, die für unterschiedliche Anwendungsfälle benutzt werden, wie Konstruktionenstücklisten, Fertigungsstücklisten, Vertriebsstücklisten, Instandhaltungsstücklisten usw.

Änderungen an Objekten werden auch in einigen ERP-Systemen dokumentiert. Hierfür wird ein Änderungsstammsatz mit zeitlicher Gültigkeit durchgeführt. Der Änderungsstammsatz ist ein Datensatz, der die zur Verwaltung einer Produktänderung notwendigen Informationen enthält. Er enthält Daten mit beschreibendem Charakter, wie Änderungsstatus und Änderungsgrund usw., und Daten mit Steuerungsfunktion, wie das Datum, ab dem die Änderung gültig sein soll. Neben diesen Daten, die direkt vom Benutzer gepflegt werden, gibt es auch Daten, die durch das System automatisch fortgeschrieben werden (wie Verwaltungsdaten).

Der Status einer Änderung im Änderungsstammsatz beschreibt den Fortschritt bei der Umsetzung der Änderung. Betroffene Objekte wie Materialen, Stücklisten, Dokumente usw. können mit dem Änderungsstammsatz verlinkt werden.

Die obigen Ausführungen zeigen, dass ERP-Systeme fixierte und reproduzierbare Prozesse, wie die Bearbeitung von Fertigungsaufträgen, die Veranlassung von Bestellungen, Finanz-Controlling und -buchhaltung usw. unterstützen. Diese Abläufe kommen so in der Produktentwicklung in dieser Form nicht vor. Vielmehr werden Applikationen benötigt, die die Kreativität des Konstrukteurs nicht einschränken und die Umsetzung seiner Ideen unterstützen (Vajna et al. 2007; Eigner und Stelzer 2001). Vor allem spielt PDM eine zentrale Rolle bei der Unterstützung des Entwicklungsprozesses.

Ein PDM-System kümmert sich hauptsächlich um die Verwaltung der im Laufe der Produktentwicklung anfallenden Daten und bereitet diese aus funktioneller Sicht auf. Die resultierenden Informationen müssen schließlich ans ERP-System zur Produktionsplanung und -steuerung als Voraussetzung für die Auftragsbearbeitung und die Fertigungsplanung übergeben werden.

Pos.	PtP/Komponente	Komponentenbezeichnung	Menge	ME	BGr	UPS	Gültig ab	Gültig bis	Änderungsnr.	D	SortBegr.	PosID	AndNr bis	G Fix
0010	L 813192	Polster, unten (VHK + VK1,00)	ST	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000001			
0020	L 0020016981	Bodenplatte, ipl.	1,00	ST	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000002			
0030	L 0020025190	Träger, lackiert	1,00	ST	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000003			
0040	L 0020017560	Isolierung unten	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000004			
0050	L 0020017561	Distanzblock	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000005			
0060	L 0020097112	Wärmetauscher, ipl. D'	1,00	ST	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	00.07.2003	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000004			
0065	L 0020025193	Schale	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000007			
0066	Z 0020023159	Ringschraube DIN 1580 M81,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000008			
0067	Z 492032	Scheibe	2,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000009			
0068	Z 490195	Scheksamnmutter	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000010			
0070	L 00200272308	Druckwächter, ipl.	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000011			
0080	L 100372	TEMPERATURBEGRENZUNG1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	07.08.2008	31.12.9999	1016956	<input type="checkbox"/>	00000090			
0085	L 0020042256	Sensor (NTC 35-65 K/V)	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	07.08.2008	31.12.9999	1016956	<input type="checkbox"/>	00000091			
0090	L 902682	Formdichtung (Tip 48) D'	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000012			
0100	L 900684	Formdichtung (Tip 12)	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000013			
0110	L 900683	Formdichtung (Tip 42)	1,00	ST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000014			
0115	Z 910418	Fett BERULUB SIHAF2	0,010	KG	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30.07.2008	31.12.9999	1014747	<input type="checkbox"/>	00000009			

Abb. 7.25 Auszug aus einer Produktstückliste (System SAP)

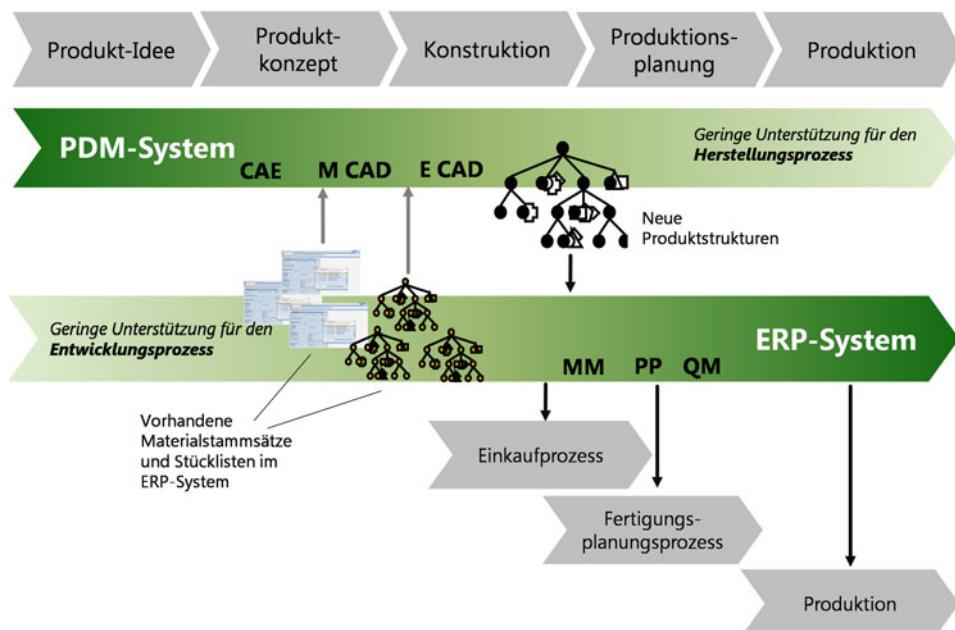


Abb. 7.26 Zusammenspiel zwischen PDM und ERP im Produktentstehungsprozess

Aus diesem Grund ist eine enge Verzahnung von PDM und ERP von großer Bedeutung. Über eine entsprechende Schnittstelle werden Komponenten und deren Strukturen (Konstruktionsstückliste) nach Abschluss der Konstruktion vom PDM zu ERP direkt übertragen und müssen nicht neu angelegt werden. Auch während der Entwicklung von neuen Produkten benötigt der Konstrukteur öfter einen Zugang zu einigen im ERP-System hinterlegten Informationen zu existierenden Komponenten, z. B. Herstellkosten, Lieferant usw., oder zu Stücklisten vorhandener Produkte. Ein solches Konzept ist in Abb. 7.26 dargestellt.

Andererseits hat die zunehmende Bedeutung von PDM für den Engineering-Prozess die Anbieter von ERP-Systemen dazu motiviert, ihre Systeme mit entsprechenden PDM-Funktionalitäten auszustatten. Das hat den Vorteil, dass hier eine Systemschnittstelle vermieden werden kann. Nachteilig ist, dass bei einem derartigen Konzept die Verwaltung von Produktdaten, insbesondere 3D-CAD, nicht immer durchgängig gut und effizient erfüllt werden kann.

Existiert in einem Unternehmen neben einem PDM-System auch ein ERP-System mit PDM-Funktionalitäten, sollte eine Redundanz bei der Produktdatenverwaltung vermieden werden (Eigner und Stelzer 2001).

---

## Literatur

Eigner M, Stelzer R (2009) Product lifecycle management, 2. Aufl. Springer, Berlin

### Abschnitt 7.1

Lemburg JP (2009) Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese. Dissertation an der RWTH Aachen, in Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Bd 06

### Abschnitt 7.2

Beitz W (1990) Konstruktionsleitsystem als Integrationshilfe. VDI-Berichte Nr. 812. VDI Verlag, Düsseldorf, S 181–201

Beitz W, Feldhusen J (1991) Management systems and program concepts for an integrated CAD process. Res Eng Des 3(1991):61–73

Beitz W, Kuttig D (1992) Rechnerunterstützung beim Konzipieren. VDI-Berichte Nr. 953. VDI Verlag, Düsseldorf, S 1–24

Diereneder S (2000) Computergestütztes Konzipieren auf der Basis einer „Funktionalen Zergliederung“. Konstruktion 2000/7, S 51–55

Eigner M, Stelzer R (2001) Produktdatenmanagement-Systeme: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Springer, Berlin

Feldhusen J, Lashin G (1994) Erfahrungen beim Einsatz von CAD im Bereich der Konstruktion von Bahngeräten. Konstruktion 46, Heft 10. Springer, Berlin, S 342–348

- Feldhusen J, Lashin G (1996) Systemwechsel 2D > 3D – Ein Praxisbericht. In: VDI-Berichte 1289 „Effiziente Anwendung und Weiterentwicklung von CAD/CAM-Technologien“. VDI-Verlag, Düsseldorf, S 485–501 (auch in: VDI-Jahresbuch 97, VDI-Verlag, Düsseldorf, S 196–212)
- Feldhusen J, Lashin G (1997) Gesichtspunkte zum Einsatz von 3D-CAD am Beispiel der Schienenfahrzeugindustrie. In: VDI-Berichte 1357 „Neue Generation von CAD/CAM-Systemen“. VDI-Verlag, Düsseldorf, S 375–396
- Feldhusen J, Lashin G (1998) Top-Down-Konstruktion auf der Basis von 3D-CAD – Ansätze und Voraussetzungen für den Einsatz im Maschinenbau. In: VDI-Berichte 1435 „Prozessketten für die virtuelle Produktentwicklung in virtueller Umgebung“. VDI-Verlag, Düsseldorf, S 277–301
- Feldhusen J, Lashin G (1999) 3D-CAD-Technik in der Praxis: Implementierung, Management, Anwendung, Wirtschaftlichkeit, Risiken. Konstruktion 290. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, S 107–114
- Feldhusen J, Gebhardt B (2008) Product Lifecycle Management für die Praxis: Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung. Springer, Berlin
- Forkel M (1995) Kognitive Werkzeuge – ein Ansatz zur Unterstützung des Problemlösens. In: Spur G (Hrsg) Reihe Produktionstechnik Berlin, Nr. 166. Hanser, München (Diss.)
- Gebhardt A (1996) Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung. Hanser, München
- Groeger B (1992) Die Einbeziehung der Wissensverarbeitung in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. In: Beitz W (Hrsg) Schriftenreihe Konstruktionstechnik der TU Berlin, Heft 23
- Groeger B, Klein S (1992) Unterstützung der Produktoptimierung durch Kopplung von CAD- und wissenbasierten Systemen. VDI-Berichte Nr. 933.3. VDI Verlag, Düsseldorf
- Groeger B, Klein S, Suhr M (1992) Auslegung von Verbindungselementen am Beispiel der Welle-Nabe-Verbindung mit Hilfe der Wissensverarbeitung. Konstruktion 44, S 145–153
- Haasis S (1995) Integrierte CAD-Anwendungen – Rationalisierungspotentiale und zukünftige Einsatzgebiete. Springer Verlag, Berlin
- Henning A (1997) Die andere Wirklichkeit – Virtual Reality (Konzepte, Standards, Lösungen). Addison Wesley Longmann Verlag GmbH
- Kiesewetter T (1996) Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia und Breitbandkommunikation. Diss. TU Berlin
- Kuttig D (1992) Funktionsstruktur als integraler Bestandteil des rechnerunterstützten Konstruktionsprozesses. Konstruktion 44, S 183–192
- Lashin G (1992) Rechnerunterstützte Bereitstellung von ungeordneten Kleinteilen für die automatisierte Montage. Diss. TU Berlin. Hanser, München
- Lashin G (2009) Engineering Backbone als Kern des PLM-Einsatzes. In Messago Kongress „Product Life live“. VDE Verlag GmbH, Berlin
- Lashin G, Feldhusen J (1996) A CAD-Based tool for development of large layouts. Research in engineering design, Bd 8. Springer, London, S 217–228
- Liu J (1995) Handskizzeneingabe von Freiformgeometrien für CAD-Modelle. In: Spur G (Hrsg) Produktionstechnik Berlin, Nr. 137. Hanser, München
- Müller J, Praß P, Beitz W (1992) Modelle beim Konstruieren. Konstruktion 10
- Pohlmann G (1982) Rechnerinterne Objektdarstellungen als Basis integrierter CAD-Systeme. Reihe Produktionstechnik Berlin, Bd 27. Hanser, München
- Rieger E (1995) Semantikorientierte Features zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktgestaltung. In: Spur G (Hrsg) Produktionstechnik – Berlin, Nr. 158. Hanser, München (Diss.)
- Roller D (1995) CAD – Effiziente Anpassungs- und Variantenkonstruktion. Springer, Berlin

- Roth K (1988) Übertragung von Konstruktionsintelligenz an den Rechner. VDI-Berichte 700.1. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Schöttner J (1999) Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie – Prinzip, Konzepte, Strategien. Hanser, München
- Spur G, Krause F-L (1984) CAD-Technik. Hanser, München
- Spur G, Krause F-L (1987) Das Virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik. Hanser, München
- Stark J (2005) Product lifecycle management: 21st century paradigm for product realisation. Springer
- Stürmer U (1990) Informationsmodell zum Abbilden funktionaler und wirkstruktureller Zusammenhänge im Maschinenbau. In: Beitz W (Hrsg) Schriftenreihe Konstruktionstechnik der TU Berlin, Heft 17
- TU-Berlin (1992) CAD – Rechnerunterstützte Konstruktionsmodelle im Maschinenwesen. Abschlußbericht SFB 203, TU Berlin
- Vajna S, Weber C, Bley H, Zeman K (2007) CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. Springer, Berlin
- VDI-Richtlinie 2209 (2009) 3-D-Produktmodellierung – Technische und organisatorische Voraussetzungen, Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen, wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. VDI-Verlag, Düsseldorf (3)
- VDI-Richtlinie 2218 (1999) Feature Technologie (Entwurf). VDI-Verlag, Düsseldorf (11)
- VDI-Richtlinie 2219 (2002) Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. VDI-Verlag, Düsseldorf (11)
- VDI Richtline 2206 (2004) Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI Verlag, Düsseldorf (6)
- VDI Richtline 3633 (2007) Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Blatt 8. VDI Verlag, Düsseldorf (4)

---

## Teil III

# Produktgestaltung

<b>8 Einleitung .....</b>	<b>463</b>
<b>9 Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses .....</b>	<b>465</b>
9.1 Einleitung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	465
9.2 Erkennen Gestalt beeinflussender Größen (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	467
9.3 Globale Betrachtung des Produkts (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .	467
9.4 Ermitteln/Festlegen der Produktstruktur (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	470
9.4.1 Der Top-Down-Prozess.....	471
9.4.2 Ermitteln der Anforderungen an die Produktstruktur .....	471
9.4.3 Die Produktgliederung .....	473
9.4.4 Die Bauteilebene .....	475
9.4.5 Festlegung der Schnittstellen des Gesamtprodukts .....	476
9.5 Geometrie und Werkstoff restlicher Komponenten (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	476
9.6 Zusammenfassung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote).....	477
<b>10 Methodik des schrittweisen Gestaltens .....</b>	<b>479</b>
10.1 Grundsätzliche Betrachtung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote).....	479
10.2 Methodik der schrittweisen Gestaltung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	481
10.2.1 Arbeitsschritt 1: Produktstruktur in Wirkkonzept kennzeichnen ..	483
10.2.2 Arbeitsschritt 2: Hauptfluss durch das Wirkkonzept eintragen ..	484
10.2.3 Arbeitsschritt 3: Am Hauptfluss beteiligte Wirkflächen kennzeichnen .....	484
10.2.4 Arbeitsschritt 4: An Wirkflächen angreifende Größen ermitteln ..	485
10.2.5 Arbeitsschritt 5: Mögliche Leitstützstrukturen kennzeichnen ..	486
10.2.6 Arbeitsschritt 6: Klären weiterer Anforderungen .....	487

10.2.7	Arbeitsschritt 7: Erster Entwurf . . . . .	487
10.2.8	Der Gestaltungsprozess in der Praxis (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	487
10.3	Zusammenfassung . . . . .	490
	Literatur . . . . .	491
<b>11</b>	<b>Grundregeln der Gestaltung . . . . .</b>	<b>493</b>
11.1	Eindeutig (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	494
11.2	Einfach (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	501
11.3	Sicher (Alfred Neudörfer) . . . . .	505
11.3.1	Rechtliche Grundlagen des sicherheitsgerechten Konstruierens . . . . .	505
11.3.2	Mit Maschinen verbundene Gefahren und Risiken . . . . .	510
11.3.3	Konstruktionsmaßnahmen . . . . .	519
	Literatur . . . . .	536
<b>12</b>	<b>Gestaltungsprinzipien . . . . .</b>	<b>539</b>
12.1	Prinzip der Kraftleitung (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	541
12.2	Prinzip der Aufgabenteilung (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	553
12.3	Prinzip der Selbsthilfe (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	561
12.4	Prinzip der Stabilität und Bistabilität (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	573
12.5	Prinzip der fehlerarmen Gestaltung (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	578
	Literatur . . . . .	580
<b>13</b>	<b>Gestaltungsrichtlinien . . . . .</b>	<b>583</b>
13.1	Zuordnung und Übersicht (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	583
13.2	Ausdehnungsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	585
13.3	Kriech- und relaxationsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl- Heinrich Grote) . . . . .	598
13.4	Korrosionsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	605
13.5	Verschleißgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	620
13.6	Blechgerecht (Jörg Heusel, Thomas Bronnhuber) . . . . .	622
13.6.1	Blech . . . . .	622
13.6.2	Die Prozesskette Blech . . . . .	627
13.6.3	Gestalten mit Blech . . . . .	627

---

13.6.4	Einsatzbereiche der Fertigungsverfahren .....	639
13.6.5	Beispiele .....	643
13.7	Konstruieren von Strukturauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden (Werner Hufenbach, Olaf Helms) .....	648
13.7.1	Aufbau und Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden ....	650
13.7.2	Konzipieren und Entwerfen von Faserverbundstrukturen .....	654
13.8	Ergonomisch (Christopher Schlick) .....	664
13.8.1	Ergonomische Grundlagen .....	665
13.8.2	Tätigkeiten des Menschen und ergonomische Bedingungen....	670
13.8.3	Erkennen ergonomischer Anforderungen .....	673
13.9	Formgebungsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> ) .....	675
13.10	Fertigungsgerecht (Fritz Klocke) .....	682
13.11	Fügegerecht (Klaus Dilger) .....	696
13.11.1	Schweißgerechte Gestaltung .....	696
13.11.2	Klebgerechte Gestaltung .....	697
13.12	Montagegerecht (Rainer Müller) .....	702
13.12.1	Begriffsklärung und Einstieg in die Montageoperationen .....	702
13.12.2	Aufgaben innerhalb des Montageprozesses .....	703
13.12.3	Einflussfaktoren montagegerechter Produktgestaltung .....	710
13.12.4	Gestaltungsgrundsätze für montagegerechte Produkte .....	712
13.13	Instandhaltungsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	726
13.14	Recyclinggerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	729
13.15	Risikogerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz <sup>†</sup> , Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	736
13.16	Bewertung von Entwürfen (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	738
	Literatur .....	739
<b>14</b>	<b>Qualitätssicherung in der Produktentwicklung und Konstruktion .....</b>	<b>753</b>
14.1	Maßnahmen zur Vermeidung produktbezogener Fehler (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	755
14.1.1	Design Reviews .....	756
14.1.2	Fehlerbaumanalyse und Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) .....	757
14.1.3	Methode QFD .....	758
14.2	Maßnahmen zur Vermeidung verfahrensbezogener Fehler (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) .....	761
14.2.1	Designlenkung nach ISO 9000 ff.....	762
14.2.2	Prozess- und Dokumentenmanagement auf PDM-System Basis ..	765
	Literatur .....	765

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Die Gestaltung eines Produkts umfasst die werkstofftechnische und geometrische Festlegung seiner Baugruppen und Komponenten bis zum Einzelteil von der Makrogestalt bis hin zu den Oberflächen. Die Gestaltung eines Produkts und seiner Einzelteile ist eine äußert komplexe Aufgabe, da dabei sehr viele Einflussgrößen beachtet werden müssen. Sie stellte in der Vergangenheit die Hauptaufgabe der Konstruktion dar und ist auch heute noch ein wesentlicher Arbeitsinhalt für diesen Bereich. In den letzten Jahren hat sich allerdings zunehmend ein weiterer bedeutender Punkt herausgebildet, durch den die Gestaltung wesentlich beeinflusst wird. Gemeint sind die unternehmensinternen und -externen Rahmenbedingungen. Die Beschaffung dieser für die Produktgestaltung notwendigen Informationen beansprucht im Konstruktionsbereich z. T. bis zu 70 % der Zeit. Den Hauptgestaltungseinfluss stellen aber nach wie vor die zu erfüllende Funktion sowie von außen wirkende Beanspruchungen dar, wie z. B. Kräfte, Momente, korrosiver Angriff, elektromagnetische Strahlen usw. Die Gestaltung eines Produkts hängt also von einer großen Zahl von Einflussfaktoren ab, s. Abb. 8.1.

Die Hauptschritte der Produktdefinition, also die Entwicklung und Konstruktion, können unter Berücksichtigung der Produktgestaltung dann in drei wesentliche Fragen gegliedert werden, s. Abb. 8.2.

---

J. Feldhusen (✉)

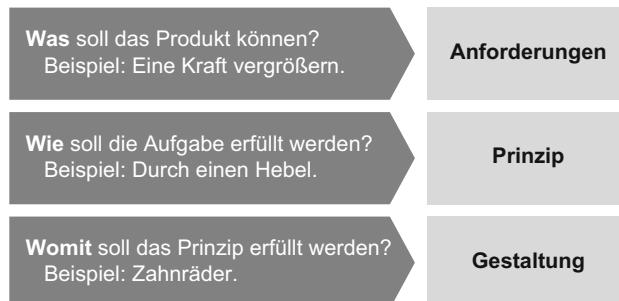
Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

Einflusscluster	Beispiel
Gesellschaft, Politik	<i>CO<sub>2</sub>-Emissionen, Energieverbrauch, Geräusche,...</i>
Gesetze, Vorschriften, Normen, Richtlinien...	<i>Maschinenrichtlinie, Maßnormen, max. Bedienzeiten,...</i>
Produktionsbedingungen	<i>Maschinenkapazität, Lieferprogramm Zulieferer, Halbzeugverfügbarkeit,...</i>
Aus eigenem Unternehmen	<i>Konstruktionshandbuch, vorhandenes Material, Mitarbeiterqualifikation,...</i>
Einsatzbedingungen des Produkts	<i>Salzwassernähe, ungeschultes Personal, Dauerbetrieb,...</i>
Zweck des Produkts	<i>Drehmoment wandeln, Schrauben produzieren,...</i>
Eigenstörung des Produkts	<i>Schwingungen, Temperaturen, Kräfte,...</i>

**Abb. 8.1** Einflussfaktoren für die Gestaltung von Produkten



**Abb. 8.2** Die drei Grundsatzfragen der Produktdefinition

Im Rahmen des Gestaltungsprozesses müssen alle diese Einflüsse auf die Gestaltung erkannt und in geeigneter Weise umgesetzt werden. Dies stellt in der Praxis naturgemäß ein sehr großes Problem dar und ist der Grund, warum eine methodische Vorgehensweise beim Gestalten angewendet werden sollte.

---

# Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

---

## 9.1 Einleitung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Die im Folgenden aufgeführten Arbeitsschritte und insbesondere ihre Reihenfolge dienen im Rahmen dieses Werks der Veranschaulichung, wann typischerweise welcher Arbeitsschritt erfolgen sollte. In der Praxis gibt es zwangsläufig z. T. deutliche Abweichungen sowohl bei den Inhalten der einzelnen Arbeitsschritte, insbesondere aber bei der hier vorgestellten Reihenfolge.

Der Gestaltungsprozess eines Produktes setzt heute viel früher ein, als es noch vor Jahren der Fall war. Hierfür können zwei Hauptursachen genannt werden:

1. Aus Kostengründen versucht jedes Unternehmen möglichst auf existierende und bekannte Komponenten zurückzugreifen. Sie neu zu entwickeln, zu konstruieren, zu fertigen und zu erproben ist normalerweise teurer. Außerdem ist das Risiko einer Fehlentwicklung so geringer.
2. Häufig werden Produkte von verschiedenen Unternehmen gemeinsam entwickelt. Hierbei bringen dann die beteiligten Unternehmen ihre bewährten Komponenten in die Produkte ein. Dieses Vorgehen und damit auch die Verantwortlichkeiten für die einzelnen Bereiche eines Produkts sind im Allgemeinen auch vertraglich geregelt.

---

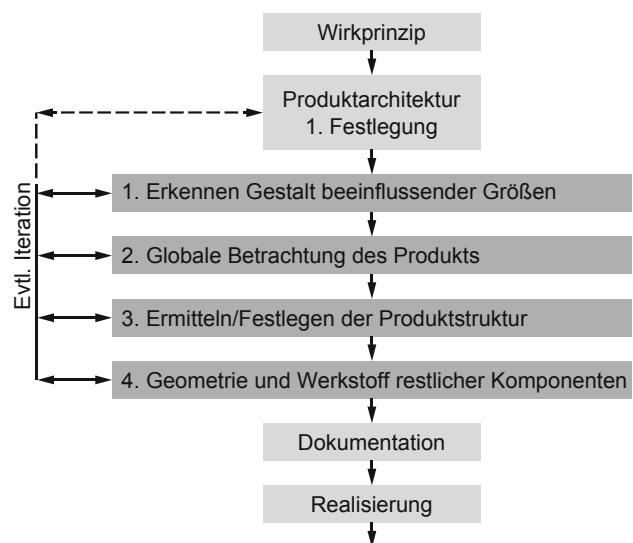
J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

**Abb. 9.1** Hauptschritte des Gestaltungsprozesses



Mit anderen Worten: Eine Entwicklung oder Konstruktion wird in der überwiegenden Zahl der Fälle nicht „bei Null“ begonnen.

Wie in Teil 1 des Buches beschrieben, beginnt heute die Gestaltung bereits mit der Festlegung der Produktarchitektur, also der Festlegung, welche Funktionen durch welche Baugruppen und Bauteile realisiert werden sollen. Wie geschildert, sind dies aber grund-sätzliche und strategische Überlegungen, um ein Produkt, z. B. in der Art eines Baukastens, ohne weitere Konstruktionstätigkeiten für möglichst viele Anwendungsfälle nutzen zu können. Im Zusammenhang mit den o. g. Punkten ist eine so entstandene Produktarchitektur nicht immer vollkommen umsetzbar. Vorhandene Baugruppen, die für das Produkt eingesetzt werden sollen, haben z. B. weniger oder mehr Funktionen, als in der ursprünglich geplanten Produktarchitektur vorgesehen.

Trotzdem ist die Produktarchitektur und die mit ihr zunächst festgelegte Aufteilung des Produkts in Baugruppen und Bauteile neben der Wirkstruktur die wichtigste Eingangsgröße für den Gestaltungsprozess. Abb. 9.1 stellt in einer Übersicht die Hauptschritte des Gestaltungsprozesses dar. Sie verdeutlicht auch, dass der Gestaltungsprozess im Allgemeinen nicht ohne Rücksprünge in vorherige Arbeitsschritte abläuft. Viele Erkenntnisse und notwendige Daten für den Gestaltungsprozess werden erst im Rahmen der Gestaltungsarbeit, also des Konstruierens erzeugt. Sie können dazu führen, dass einmal getroffene Entscheidungen korrigiert werden müssen. Beispielsweise kann es sich durch Versuche im Rahmen einer Getriebekonstruktion herausstellen, dass selbstdichtende Lager nicht eingesetzt werden können. Dann muss der Lagertyp, aber insbesondere auch die betroffene Getriebewelle umkonstruiert werden.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeitsschritte näher betrachtet und erläutert.

## 9.2 Erkennen Gestalt beeinflussender Größen (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Wie in Abb. 8.1 dargestellt, wird die Gestalt eines Produkts von einer ganzen Reihe Faktoren beeinflusst. Der erste und sehr bedeutende Schritt für die Gestaltung besteht darin, diese Faktoren für das zu gestaltende Produkt zu erkennen und ihre jeweiligen Auswirkungen abzuschätzen.

Ausgehend von der Produktarchitektur und dem Konzept für das Produkt mit den dort festgelegten Produktelementen, dient die Anforderungsliste als erste Informationsquelle für die Gestalt bestimmenden Größen. Insbesondere Einflussgrößen aus den Einflussclustern „Zweck des Produkts“, „Einsatzbedingungen des Produkts“ und „Aus eigenem Unternehmen“ finden sich in direkter Form, z. B. „Aufstandsfläche 400 mm × 600 mm“, oder in indirekter Form, z. B. „Transport auf Europoolpalette“ in der Anforderungsliste. Große Teile der die Gestalt beeinflussenden Angaben ergeben sich aber erst im Laufe des Produktentstehungsprozesses (PEP). Der zu konstruierende Flansch, an den ein gekauftes Getriebe geschraubt wird, kann erst nach dessen Auswahl bearbeitet werden. Notwendige Maßnahmen zur Schwingungstilgung können erst konstruiert werden, wenn die Schwingungen der Maschine bekannt sind.

Den heute häufig größten Einflussfaktor auf die Gestaltung bilden Gesetze, Vorschriften, Richtlinien usw. Da sie für viele Produktgruppen sehr umfangreich und schwer überschaubar sind, werden sie häufig in Unternehmen in Übersichtsdokumenten zusammengefasst. So können sich auch unerfahrene Bearbeiter orientieren. In Abb. 9.2 ist beispielhaft ein Ausschnitt einer Unternehmensunterlage wiedergegeben, in welcher die für das produzierte Produkt zu beachtenden relevanten Gesetze, Richtlinien usw. mit ihrer Bezeichnung aufgeführt sind. Das Beispiel zeigt, dass alleine dieses Einflusscluster heute extrem umfangreich sein kann.

Viele der Gestalt beeinflussenden Größen lassen sich aber nicht direkt erkennen, wie z. B. die Abmessungen einer zu verwendenden Baugruppe. Sie ergeben sich erst, wenn insbesondere der Hauptfluss des Produkts betrachtet wird, wie er das Produkt passieren soll. Daneben haben bei mechanischen Produkten insbesondere die verschiedenen wirkenden Kräfte einen wesentlichen Einfluss auf die Gestalt und die Anordnung von Komponenten.

---

## 9.3 Globale Betrachtung des Produkts (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Nachdem im ersten Schritt diejenigen Einflussgrößen betrachtet wurden, die die Gestalt direkt oder indirekt beeinflussen, beginnt mit diesem Schritt der eigentliche Gestaltungsprozess. Es ist zweckmäßig, zunächst mit einer globalen Betrachtung zu beginnen. Die Betrachtungsrichtung ist dabei „von außen nach innen“. Viele die Gestalt beeinflussenden



## Verkehrstechnik

- 45545 T6\* Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 5: Brandmelde- und Brandbekämpfungseinrichtungen und begleitende Brandschutzmaßnahmen
- 45545 T7\* Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 5: Brandschutzanforderungen an Anlagen für brennbare Flüssigkeiten und Gase
- 50121 T1 V Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 1: Allgemeines (VDE V 0115 T121-1)
- 50121 T2 V Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 2: Störaussendung des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt (VDE V 0115 T121-2)
- 50121 T3-1 V Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 3-1: Schienenfahrzeuge - Zug und gesamtes Fahrzeug (VDE V 0115 T121-3-1)
- 50121 T3-2 V Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 3-2: Schienenfahrzeuge - Einrichtungen (VDE V 0115 T121-3-2)
- 50121 T4 V Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 4: Störaussendung und Störfestigkeit von Signal- und Telekommunikationseinrichtungen (VDE V 0115 T121-4)
- 50121 T5 V Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 5: Ortsfeste Bahn-Energieversorgungsanlagen (VDE V 0115 T121-5)
- 50122 T1 Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Teil 1: Schutzmaßnahmen in bezug auf elektrische Sicherheit und Erdung (VDE 0115 T3)
- 50122 T2 E Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen die Auswirkungen von Streuströmen, verursacht durch Gleichstrombahnen (VDE 0115 T6)
- 50124 T1 E Bahnanwendungen - Isolationskoordination - Teil 1: Grundlegende Anforderungen - Kriech- und Luftstrecken (VDE 0115 T107-1)
- 50124 T2 E Bahnanwendungen - Isolationskoordination - Teil 2: Überspannungen und der zugehörige Schutz (VDE 0115 T107-2)
- 50125 T1 E Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen (VDE 0115 T108-1)
- 50126 E Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) (VDE 0115 T103)
- 50153 Fahrzeuge - Schutzmaßnahmen in bezug auf elektrische Gefahren (VDE 0115 T2)
- 50155 Elektronische Einrichtungen auf Schienenfahrzeugen (VDE 0115 T200 / IEC 60571 Ed. 1)
- 50163 Speisespannungen von Bahnenetzen (VDE 0115 T102)

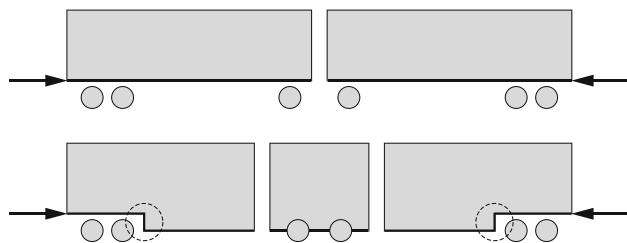
<b>VT5 / VT7 Verzeichnis:</b> Gesetze, Verordnungen, Vorschriften, Richtlinien und Normen für Schienenfahrzeuge Nahverkehr	VT59 QSB Oktober 98 Oktober 96 Juli 1995	Unterlagennummer: E44010-A8139-U003	7 von 14
---	---	--	----------------

Copyright (C) Siemens AG 1994. All Rights Reserved. Nur für internen Gebrauch

VERZ5-7.DOC

**Abb. 9.2** Ausschnitt der zu beachtenden Richtlinien bei der Konstruktion elektrischer Komponenten für Straßenbahnen

**Abb. 9.3** Globale Betrachtung eines Produkts, hier der Gestalt bestimmende Einfluss der Axialkräfte einer Straßenbahn



Größen röhren aus dem Umfeld her, in dem das Produkt eingesetzt wird. Neben dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen direkten Einflussgrößen, wie z. B. Rohrflansche oder Elektronikstecker, die angeschlossen werden müssen und konkrete Vorgaben für die Schnittstellenmaße bestimmen, sind es insbesondere Kräfte und Momente sowie Feldgrößen wie Wärmestrahlung oder elektromagnetische Strahlung, die bei der Gestaltung berücksichtigt werden müssen.

Das folgende Beispiel soll anhand von außen wirkenden Kräfte verdeutlichen, dass diese Größen einen tiefgreifenden gestalterischen Einfluss haben können. Die Auswirkungen müssen sehr früh erkannt und berücksichtigt werden, da sie insbesondere das Konzept, in diesem Beispiel den Kraftfluss durch das Produkt, beeinflussen. Fehlentscheidungen haben also sehr starke Auswirkungen, da das Konzept ja das Fundament der Konstruktion ist.

In Abb. 9.3 sind zwei alternative Konzepte für Straßenbahnen als Prinzipskizze wiedergegeben. Die obere Skizze stellt ein konventionelles Hochflurfahrzeug dar, in der unteren ist eines mit einem 70-prozentigen Niederfluranteil wiedergegeben. Eine Bauvorschrift für solche Fahrzeuge verlangt, dass in einer bestimmten Höhe des Fahrzeugs große axiale Kräfte, ca. 300 kN, von der Struktur aufgenommen werden müssen. Dies hat u. a. Sicherheitsgründe. Bei der unteren Skizze in Abb. 9.3 wird sofort die Problematik der Kraftleitung aufgrund des „geknickten“ Bodens deutlich. An der Stelle des Übergangs vom niedrigen Bodenanteil zum erhöhten (gepunktete Kreise in der unteren Skizze) wird die Kraft umgelenkt, und es sind besondere gestalterische Maßnahmen notwendig. Diese erfordern u. a. Bauraum und erhöhen wegen des zusätzlich notwendigen Materials das Gewicht. Beim oberen Fahrzeug werden die Kräfte geradlinig durch den Boden geleitet und erzeugen kein Biegemoment, das gestalterisch berücksichtigt werden muss. Die stark vereinfachte und symbolische Darstellung der beiden Fahrzeuge ist ausreichend, um ganz wesentliche die Gestalt beeinflussenden Größen zu erkennen und ihre Auswirkungen zumindest grob beurteilen zu können.

Dieses einfache Beispiel für die globale Betrachtung am Beispiel von Kräften verdeutlicht den Sinn dieser Vorgehensweise. Eventuell konzeptionelle Schwächen, hier der „geknickte“ Fußboden, können, wenn möglich, noch korrigiert werden. Wenn dies nicht möglich ist, so sind aber die mit besonderer Sorgfalt zu gestaltenden Zonen eines Produkts frühzeitig bekannt.

**Abb. 9.4** Die Teilschritte zum Aufstellen der Produktstruktur

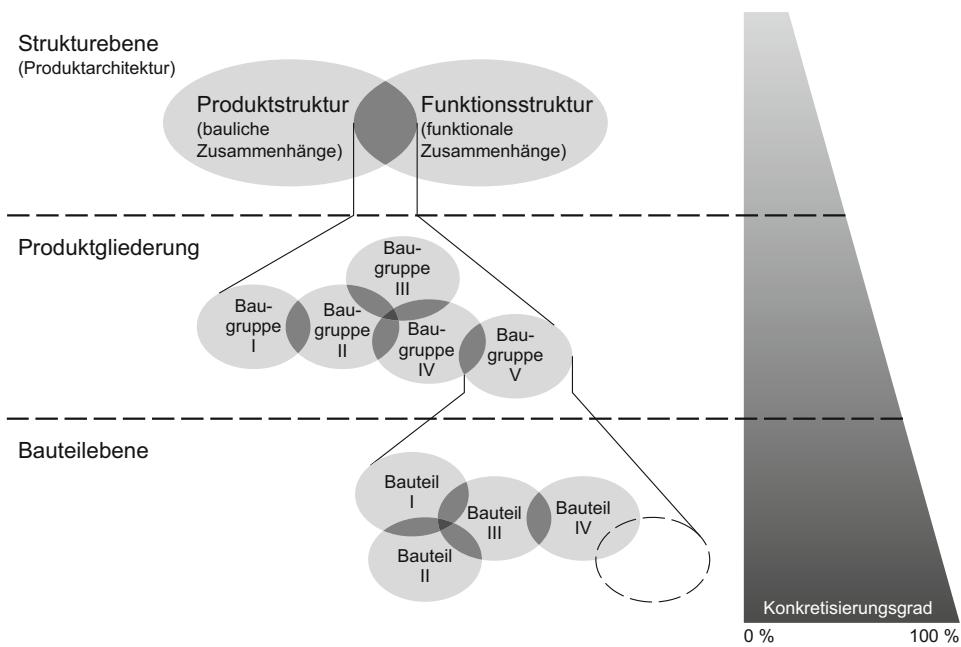


## **9.4 Ermitteln/Festlegen der Produktstruktur (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)**

Die Produktstruktur stellt gemäß den Darstellungen in Teil 1 dieses Buches das physikalische Pendant zur Funktionsstruktur dar. Sie beschreibt, wie das Produkt in Baugruppen und diese wiederum in Bauteile untergliedert werden soll. Dokumentiert wird sie mit Hilfe der Strukturstückliste des Produkts.

Es erscheint zunächst ungewöhnlich, dass ein Produkt entsprechend aufgegliedert wird, bevor es im eigentlichen Sinn konstruiert wurde, seine Baugruppen und Einzelteile also bekannt sind. Bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel wurde darauf hingewiesen, dass aus zwei Gründen möglichst vorhandene Komponenten in möglichst großem Umfang genutzt werden. Es geht also nicht darum, möglichst viele Produktkomponenten neu zu entwickeln, sondern möglichst wenige. Deshalb gliedert sich dieser Arbeitsschritt so, wie er in Abb. 9.4 dargestellt ist. Zu Beginn des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses sind also bereits eine Reihe konkreter Entscheidungen mit weitreichenden Folgen für den Aufbau und die Gestaltung des Produkts erforderlich. Deren Folgen sind nicht immer in aller Konsequenz absehbar. Deshalb kommt es auch bei diesem Teilarbeitsschritt immer wieder zu einem iterativen Zurückspringen. Sei es, um die Entscheidung und damit die Konstruktion zu verbessern, oder um deren Richtigkeit zu evaluieren.

Die Arbeitsschritte zum Aufstellen der Produktstruktur können mit Hilfe des Top-Down-Prozesses beschrieben werden.



**Abb. 9.5** Der Top-Down-Prozess

#### 9.4.1 Der Top-Down-Prozess

Der Top-Down-Prozess, s. Abb. 9.5, stellt den wichtigsten Teil des Hauptarbeitsschritts 3 zur Gestaltung dar. Er gliedert sich in drei Hauptteile, von denen der erste, Aufstellen der Produktarchitektur, bereits behandelt wurde. Der zweite Schritt hat also als Eingangsgröße die erste Festlegung der Produktarchitektur. Im dritten Schritt wird das Produkt dann bis hinunter zur Bauteilebene aufgegliedert. Das Ziel ist es, das Produkt nach vorgegebenen Kriterien systematisch in Baugruppen und Bauteile aufzuteilen. Entscheidend dabei sind die Festlegung der jeweiligen Schnittstellen von Baugruppen oder Bauteilen untereinander sowie die Bestimmung des jeweiligen Bauraums. Dieses Vorgehen ist Voraussetzung, um die Entwicklung und Konstruktion der einzelnen Elemente weitgehend unabhängig voneinander betreiben zu können und so die Arbeitsschritte zu parallelisieren. Allerdings sind eine Reihe von Anforderungen bei der Strukturierung des Produkts in Baugruppen und Bauteile zu beachten.

#### 9.4.2 Ermitteln der Anforderungen an die Produktstruktur

Die Produktanforderungen beeinflussen sehr stark, wie ein Produkt hergestellt werden kann, welche Standardbauteile verwendet werden können usw. Deshalb sind hier eine Reihe grundsätzlicher Überlegungen erforderlich. In der industriellen Praxis werden diese

Anforderungen gemeinsam mit dem Einkauf, der Fertigung, dem Service usw. getroffen, da die Produktgliederung all diese Bereiche beeinflusst. Dabei ist zu beachten, dass ein Teil dieser Anforderungen sich erst während der Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit ergeben, wenn also deutlich wird, welche Baugruppen und Bauteile zur Funktionserfüllung prinzipiell benötigt werden. In Abb. 9.5 wird dies durch die gestrichelte Linie zwischen der Strukturebene und der Produktgliederung verdeutlicht.

Die strukturellen Überlegungen zu einem Produkt, also wie und in welche Baugruppen und Einzelteile es gegliedert werden soll und wie diese wiederum untereinander zusammenhängen, sind in der letzten Dekade immer bedeutender geworden. Dies liegt darin begründet, dass die Produktstruktur Basis für die Planung der Produktion ist und damit sehr wichtige Informationen für das Produktionsplanungssystem (PPS) als Teil eines ERP-Systems (Enterprise-Ressource-Planning-System), dem bedeutendsten Planungsinstrument eines Unternehmens, darstellt. Über diese Systeme wird nicht nur die Fertigung, sondern auch der Einkauf als zweiter wichtiger Partner für die Produktion gesteuert.

In erster Linie stehen bei der Strukturierung des Produkts in Baugruppen, Unterbaugruppen und Bauteilen technische und funktionale Gesichtspunkte im Vordergrund. Hierzu gehören z. B. Aspekte wie die Fertigung, Montage und Transport, die Wartbarkeit des Produkts, der Kraftfluss usw. Allerdings hat sich hinsichtlich der Bedeutung dieser Gesichtspunkte ein Wandel vollzogen. Nichttechnische Gesichtspunkte haben deutlich an Bedeutung gewonnen.

Unter dem Stichwort „Reduktion der Fertigungstiefe“ haben sich viele Unternehmen von einem produzierenden Unternehmen in ein montierendes gewandelt. Die Gründe für dieses Phänomen sind vielfältig. Insbesondere zwei sind aber am einflussreichsten. Zum einen sind dies Kostengesichtspunkte, Baugruppen können weltweit günstiger eingekauft als selbst hergestellt werden. Der zweite Grund ist der häufig vertraglich geregelte Zwang, ein Produkt, zumindest teilweise, beim Kunden vor Ort zu fertigen. Dies wird als „Local-Content“ bezeichnet. Daneben gibt es natürlich noch weitere Gründe, wie mangelnde Kapazität oder Kompetenz, warum Teile von Produkten nicht selbst entwickelt und hergestellt werden.

In vielen Unternehmen haben die oben aufgeführten Überlegungen zu sog. „Make-or-Buy-Strategien“ geführt. Es findet also eine bewusste Aufteilung von Bauteilen und Baugruppen statt, in solche, die grundsätzlich selbst gefertigt werden und solche, die beschafft werden.

Dazu kommen häufig vertragliche Bindungen, wenn Produkte in Arbeitsgemeinschaften oder sonstigen Verbünden von mehreren Unternehmen gemeinsam erstellt werden. Dann ist die Aufteilung von Baugruppen und Bauteilen des Produkts auf die einzelnen Partner von vorneherein festgelegt.

Im Ergebnis führen die oben gemachten Ausführungen dazu, dass ein Produkt bereits sehr frühzeitig aufgegliedert werden muss. In Tab. 9.1 sind die wesentlichsten Kriterien aufgeführt, die die Produktgliederung beeinflussen.

Tabelle 9.1 verdeutlicht auch, dass die Kriterien z. T. widersprüchlich sind. Das Ergebnis dieser ersten Tätigkeiten zur Produktgliederung sind die Anforderungen an die Aufteilung eines Produkts in Baugruppen, bzw. Bauteile. Die physikalische Verknüpfung der me-

**Tab. 9.1** Kriterien zur Produktgliederung

Technische Kriterien	Nichttechnische Kriterien
Kraftfluss nicht unterbrechen	Make-or-Buy-Strategie des Unternehmens
Momentenfluss nicht unterbrechen	Einkaufsstrategie
Eine Funktion nicht auf mehrere Funktionsträger aufteilen	Vertraglich geregelte Baugruppenaufteilung
Verfügbare Halbzeuge	Vorhandenes Material/Baugruppen
Katalogbaugruppen und -bauteile	Fehlendes konstruktives/fertigungs-technisches Wissen
Reparaturmöglichkeit sicherstellen	Austauschbarkeit sicherstellen
	Möglichst Normteile verwenden

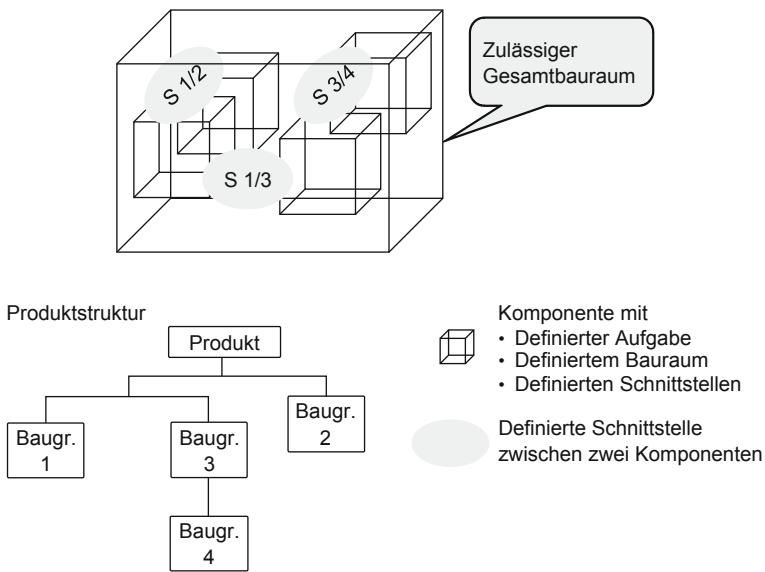
chanischen und elektrischen Komponenten bzw. deren datentechnisches Zusammenspiel wird im Rahmen der zweiten Phase des Top-Down-Prozesses, der „Produktgliederung“, festgelegt.

### 9.4.3 Die Produktgliederung

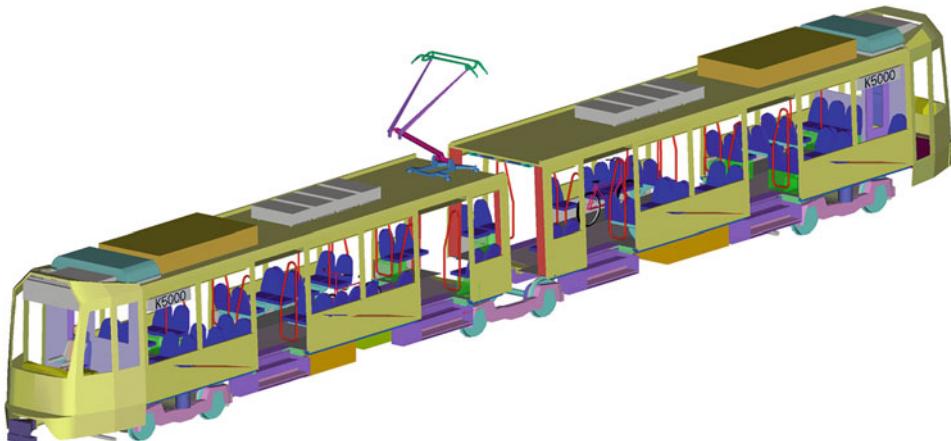
Im Rahmen der zweiten Phase des Top-Down-Prozesses, s. Abb. 9.5, werden die Bauräume der einzelnen Baugruppen und ihre Schnittstellen untereinander soweit wie möglich festgelegt. Da in der Praxis ein Produkt meistens aus einem Mix von bereits vorhandenen und noch zu entwickelnden Komponenten besteht, ergeben sich dabei insbesondere die Schnittstellen der noch nicht vorhandenen Komponenten zu vorhandenen Komponenten zwangsläufig. Für den Arbeitsablauf in dieser zweiten Phase ist deshalb zuerst die Klärung der zu berücksichtigenden Schnittstellen vorhandener Komponenten sowie deren notwendiger Bauraum erforderlich, nachdem der Gesamtbauraum des Produkts sowie seine Schnittstellen nach außen festgelegt bzw. ermittelt wurden. Dies führt zu einem Daten- und Geometriegerüst, in das sich die restlichen Komponenten einfügen müssen. Gleichzeitig ist der zulässige Gesamtbauraum in seinen einzelnen Dimensionen zu beachten. In Abb. 9.6 sind die Ergebnisse der Phase 2 in symbolischer Form wiedergegeben.

Durch diese Vorgehensweise können insbesondere in der Konstruktionsabteilung eines Unternehmens die Arbeiten parallelisiert werden. Zusätzlich kann der Einkauf für die bereits als Zukaufteil definierten Komponenten sehr früh agieren. So ist eine erste Voraussetzung zur Verkürzung der Durchlaufzeit gegeben.

Abbildung 9.7 zeigt ein Beispiel für die Produktgliederung einer Straßenbahn auf Basis der Produktarchitektur. Sie zeigt ein konkretes Beispiel für ein Ergebnis nach Abb. 9.6. Die globalen Einflussgrößen der Gestaltung waren hier, neben den Kräften wie in Abb. 9.3 dargestellt, insbesondere die Hüllkurve sowie die erforderliche Traktion. Die Hüllkurve beschreibt den notwendigen Freiraum für das Fahrzeug, damit es nicht mit der vorhandenen Infrastruktur oder anderen Straßenbahnen kollidiert. Durch sie wird u. a. die Gestalt des Kopfes bestimmt und die Anzahl und Längen der Wagenteile. Die Anordnung der auf dem



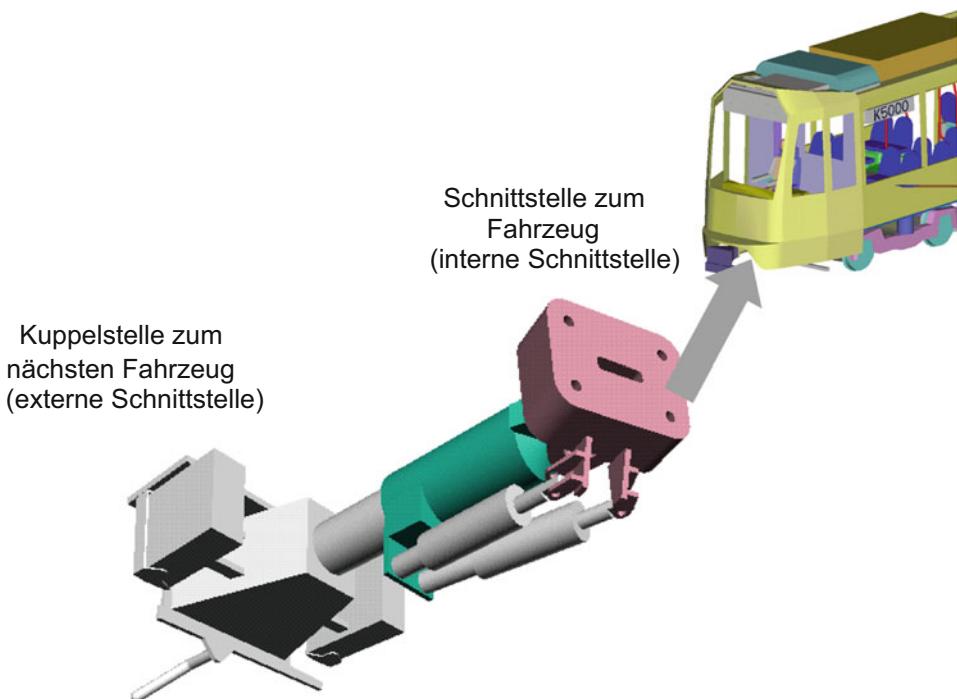
**Abb. 9.6** Darstellung der prinzipiellen Ergebnisse der Phase 2 des Top-Down-Prozesses



**Abb. 9.7** 3D-CAD-Bild der Produktgliederung einer Straßenbahn auf Basis der Produktarchitektur

Dach beider Fahrzeugteile am Ende zu erkennenden Stromrichter wird wesentlich durch die erforderliche Traktion, also die Erzeugung der Reibkraft zwischen Rädern und Schiene bestimmt.

Ein Beispiel zur weiteren Festlegung einer Komponente im Rahmen dieses Arbeitsschritts zeigt Abb. 9.8. Sie stellt eine teleskopierbare Kupplung für eine Straßenbahn dar. Sie kann bei Nichtgebrauch mit Hilfe des zentralen Hydraulikzylinders eingefahren werden. Neben dem Kopf zum mechanischen Kuppeln zweier Fahrzeuge, im Bild unten links, befinden



**Abb. 9.8** Beispiel einer in Phase 2 des Top-Down-Prozesses festgelegten Baugruppe mit ihren internen und externen Schnittstellen

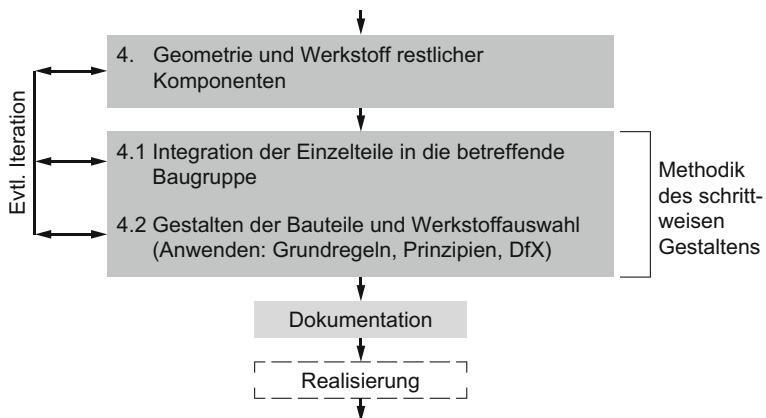
sich die beiden elektrischen Kupplungen für Nieder- und Hochstrom. Diese Baugruppe besteht also wiederum aus Einzelteilen und weiteren Unterbaugruppen.

Die bisherigen Ausführungen zur Phase 2 des Top-Down-Prozesses verdeutlichen auch, dass z. T. umfangreiche Untersuchungen und Berechnungen erforderlich sind, um ein Ergebnis wie in Abb. 9.7 zu erreichen. In der Praxis können dazu durchaus mehrere Iterationsschritte notwendig sein.

#### 9.4.4 Die Bauteilebene

Im Rahmen der Phase 3 des Top-Down-Prozesses nach Abb. 9.5, der Bauteilebene, wird prinzipiell genauso verfahren wie in der zweiten Phase. Aus dem vorhergehenden Arbeitsschritt ist der zulässige Bauraum der gesamten Komponente bekannt, ebenso ihre Schnittstellen innerhalb und außerhalb des Produkts. Damit kann eine Baugruppe in Einzelteile gegliedert und deren Schnittstellen untereinander festgelegt werden.

Das prinzipielle Vorgehen und die grundsätzlichen Ziele sind wie bei der Baugruppen-ebene beschrieben. Die grundsätzlichen Anforderungen an die Bauteilgliederung sind bereits im Arbeitsschritt 3.1, s. Abb. 9.4, festgelegt worden. Der bedeutendste und in der Praxis



**Abb. 9.9** Die Teilschritte zum Gestalten der Einzelteile

schwierigste Schritt ist die Zusammenführung der Einzelteile zu einer Baugruppe. Dies stellt den Kern der Gestaltungsarbeit dar. Hierauf wird später ausführlich eingegangen.

#### 9.4.5 Festlegung der Schnittstellen des Gesamtprodukts

Mit der Aufteilung der Baugruppen in Bauteile ist das Produkt vollständig strukturiert. Damit seine Baugruppen und Einzelteile endgültig gestaltet werden können, müssen vorher alle Schnittstellen des Produkts, mechanische, elektronische und softwaretechnische, mit seiner Umgebung festgelegt werden. Diese Festlegung orientiert sich an den bereits von der Produktumgebung vorgegebenen Schnittstellen oder wird mit den für diese Verantwortlichen abgestimmt.

---

### 9.5 Geometrie und Werkstoff restlicher Komponenten (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Nach der Ausführung der oben behandelten Arbeitsschritte beginnt mit diesem die Konstruktions- und Gestaltungsarbeit im engeren Sinne. In Abb. 9.9 sind die Hauptarbeitsschritte wiedergegeben.

Die Abbildung soll verdeutlichen, dass bei der Detailkonstruktion eines Produkts eine Reihe von Regeln beachtet werden müssen. Auf die aufgeführten Grundregeln der Gestaltung, die Prinzipien der Gestaltung und das Design for X, wobei das X für die Gestaltanforderungen steht, wie sie sich aus den Bedürfnissen anderer Bereiche ergeben, wird in späteren Kapiteln dieses Teils eingegangen.

## 9.6 Zusammenfassung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Der gesamte Gestaltungsprozess kann in vier Hauptschritte gegliedert werden. Die Gestaltung beginnt sinnvoller Weise mit einer Betrachtung „von außen nach innen“. Der Einfluss der Produktumgebung muss geklärt sein, bevor Details behandelt werden können. Von größter Bedeutung ist Schritt 3 nach Abb. 9.1, die Festlegung der Produktstruktur. Durch sie wird das gesamte Unternehmen direkt oder indirekt beeinflusst.

Die detaillierte Gestaltung inklusive der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes erfolgt im Anschluss an die Strukturierung und Aufgliederung des Produkts. Je nachdem, wie groß der Umfang an bereits vorhandenen Baugruppen und Bauteilen ist, die für das Produkt verwendet werden sollen, stellt dieser Arbeitsschritt den größten Anteil der Arbeiten in der Praxis dar.

Da die Integration der Bauteile in Baugruppen und ihre Gestaltung sehr anspruchsvoll sind, wird im folgenden Abschnitt eine Methodik vorgestellt, die auf Basis systematischen Vorgehens zu einer zweckgerechten Gestaltung von Bauteilen führt.

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

---

## 10.1 Grundsätzliche Betrachtung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Bereits in Teil 2 dieses Buches wurde auf die von Lemburg (Lemburg 2009) dargestellte Vorgehensweise bei der Lösungsfindung verwiesen. Bei der Gestaltung eines Produkts handelt es sich ebenfalls um einen Prozess zur Lösungsfindung, hier um die Auswahl der geeigneten Werkstoffe und um die Festlegung der Makro- und Mikrogeometrien. Auch bei der Gestaltung kann das opportunistische Prinzip der spontanen Idee angewendet werden und ist häufig sehr effektiv. Allerdings besteht in der Praxis die Gefahr, dass solche ersten Entwürfe ohne weitere Analyse weiterverfolgt und Fehler oder Mängel erst sehr spät entdeckt werden. Deshalb ist ein ständiger Wechsel zwischen Analyse und Synthese bei der Produktgestaltung wichtig, s. auch Abb. 10.9.

Bei der Gestaltung eines Produkts muss berücksichtigt werden, dass es zwei Konzepte beinhaltet, die sich gegenseitig beeinflussen. Diese sind das:

- **Wirkkonzept (WK):** Es wird zuerst festgelegt und gibt die zur Funktionserfüllung gewählten physikalischen Effekte und deren Verknüpfung untereinander, die prinzipi-

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,

Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland

E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,

Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland

E-Mail: karl.grote@ovgu.de

**Abb. 10.1** Kopplung der beiden Grundkonzepte eines Produkts durch die Wirkflächenpaare



ellen Werkstoffarten (Effektträger) sowie die Gestaltung der **Wirkflächen (WF)** wieder (Seine Erstellung wurde in Teil 2 des Buches behandelt.)

- **Gestaltungskonzept (GK):** Es legt die Hauptabmessungen und -gestaltung sowie die Zuordnung der Elemente eines Produkts untereinander unter Berücksichtigung des Hauptflusses und evtl. Nebenflüsse fest.

Entsprechend Abb. 10.1 sind diese beiden Grundkonzepte des Produkts durch die Wirkflächen gekoppelt:

- **Geometrie des Wirkorts:** Hier wird der physikalische Effekt erzwungen. Dazu sind zwei Wirkflächen (WF) in Form eines Wirkflächenpaares (WFP) erforderlich.

Mit der Wirkfläche werden die qualitativen Gestaltparameter des Wirkortes festgelegt. An dieser Stelle werden also die drei wesentlichen Größen eines Konzepts, der umzusetzende physikalische Effekt, der gewählte Werkstoff (qualitativ) und die Geometrie des Wirkortes, zusammengeführt. Über die Verbindung von zwei Wirkflächen zu einem Wirkflächenpaar entsteht ein geschlossener Zusammenhang zwischen allen Komponenten des Konzepts durch den Hauptfluss über die jeweiligen Wirkflächen. Dabei gibt es Fälle, in denen die Wirkflächen nur zeitlich begrenzt aktiv sind und nur im Augenblick ihres gegenseitigen Kontakts die gewollte Funktion realisieren. In Matthiesen (2002) wird dieser Kontakt als Funktionskontakt bezeichnet.

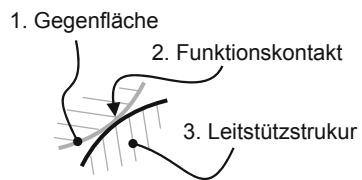
- **Funktionskontakt (FK):** Kontakt des Wirkflächenpaares, in dem die Funktionserfüllung aktuell stattfindet.

Ein Beispiel für solch einen Funktionskontakt sind die Zahnräder eines kämmenden Zahnradsaars. Es sind jeweils verschiedene Zähne in Kontakt und die Kontaktfläche bleibt beim Abwälzen der Zähne aufeinander nicht dieselbe.

Insbesondere ist bei komplexen Gestaltungsaufgaben ein systematisches Vorgehen sinnvoll. Häufig ist eine eindeutige Leitung des Hauptflusses durch das Produkt, also von Wirkflächenpaar zu Wirkflächenpaar, nicht ohne Weiteres erkennbar. Matthiesen schlägt insbesondere für diese Fälle die Leitstützstruktur vor (Matthiesen 2002).

- **Leitstützstruktur (LSS):** Leitstützstrukturen sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Signal zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen (Matthiesen 2002).

**Abb. 10.2** Wirkflächenpaar mit Leitstützstruktur (nach Lemburg 2009)



**Abb. 10.3** Wirkflächenpaar mit den möglichen Leitstützstrukturen (nach Lemburg 2009)

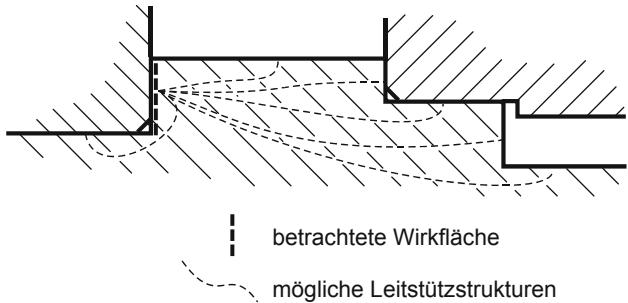


Abb. 10.2 gibt ein einfaches Beispiel für ein Wirkflächenpaar und eine Leitstützstruktur wieder.

In Abb. 10.3 ist ein Wirkflächenpaar dargestellt, und die möglichen Leitstützstrukturen sind eingezzeichnet. Damit gibt diese Abbildung auch die hier vorhandene Tragstützstruktur (TS) wieder.

- **Tragstruktur (TS):** Die Tragstruktur ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen (Matthiesen 2002).

Neben der oben aufgeführten Leitstützstruktur grenzt Matthiesen (Matthiesen 2002; Albers und Matthiesen 2002) noch weitere Gestaltungsgrößen ab:

- **Begrenzungsflächen (BF):** Feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die nie Wirkflächen sind.
- **Reststrukturen (RS):** Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felderfüllten Räumen, die nie Tragstruktur werden.

## 10.2 Methodik der schrittweisen Gestaltung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Bei der schrittweisen Gestaltung wird der Prozess zur Gestaltung der Einzelteile und des gesamten Produkts in kleine, systematische und nachvollziehbare Schritte zerlegt. Dabei ist nicht so sehr deren Reihenfolge von Bedeutung. Vielmehr kommt es auf die Ausführung jedes dieser Schritte an, um nicht wesentliche, die Gestalt beeinflussende Faktoren zu übersehen. Dabei geht es um die endgültige Festlegung aller Einzelheiten des Produkts. Im

Sinne mechatronischer Produkte bezieht sich dieser Gestaltungsvorgang also nicht nur auf die geometrische Gestaltung. Vielmehr sind hiermit auch die Gestaltung und das Layout der elektrischen, elektronischen sowie softwaretechnischen Komponenten des Produkts gemeint. Im Rahmen dieses Werks soll der Betrachtungsschwerpunkt auf der geometrischen Festlegung liegen. Wenn elektrische oder elektronische Komponenten die Geometrie des Produkts beeinflussen, so wird hierauf entsprechend eingegangen.

In Abschn. 9.6 wurde bereits auf die Betrachtungsweise beim Erkennen der die Gestalt beeinflussenden Größen hingewiesen. Hierbei wird „von außen nach innen“ vorgegangen. Dabei wird zunächst der Hauptfluss betrachtet, wie er mittels der beteiligten Wirkflächenpaare durch das Produkt fließt. Bei dem hier behandelten Gestaltungsschritt ist die Betrachtungsrichtung umgekehrt. Es wird also „von innen nach außen“ vorgegangen. Dies ist die klassische Vorgehensweise beim Konstruieren. Anders ausgedrückt werden beispielsweise bei der Konstruktion eines Stirnradgetriebes nicht zuerst die Lager und Dichtungen ausgewählt. Vielmehr werden als Erstes die Achsabstände, letztlich also der Abstand der Mittellinien der Getriebewellen, ermittelt. Dann erfolgt die grobe Festlegung der Wellendurchmesser durch Berücksichtigung der gewählten Werkstoffe und der zu übertragenden Drehmomente. Durch die dann folgende erste grobe Konstruktion der Zahnräder mit den zugehörigen Welle-Nabe-Verbindungen wird normalerweise auch die Konstruktion der Wellen beeinflusst. So kommt das beim Konstruieren typische iterative Vorgehen zustande. Nach der ersten Auswahl der Lager kann dann das Getriebegehäuse grob gestaltet werden.

Wie bereits erwähnt, ist dieses iterative Vor- und Zurückspringen bei der Gestaltung typisch. Begründet ist es in der gegenseitigen gestalterischen Beeinflussung der Produktkomponenten und der Notwendigkeit, eine Komponente in ihrer Gestalt festzulegen. Dabei wird vom Groben, Qualitativen, zum Feinen, Quantitativen gestaltet. Der Gestaltungsprozess läuft also in zwei Stufen ab (Koller 1998):

- Durch **qualitatives** Gestalten werden die Gestaltelemente und die Struktur ihrer Anordnung festgelegt.
- Durch **quantitatives** Gestalten werden die Abmessungen der Gestaltelemente selbst und ihre Winkel zueinander sowie ihre Abstände untereinander festgelegt.

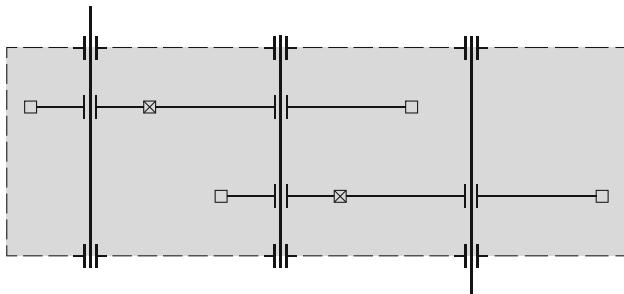
In der konstruktiven Praxis werden diese beiden Hauptschritte aber typischerweise nicht nacheinander und aufeinander aufbauend ausgeführt, sondern erfolgen häufig im Wechsel. Der gesamte Gestaltungsprozess kann grob in die Hauptphasen Entwurf und Ausarbeitung eingeteilt werden. Allerdings ist auch hier eine klare Trennung nicht möglich. Wie oben geschildert, wird bei der Produktentwicklung möglichst weitgehend auf bekannte und existierende Lösungen zurückgegriffen. Für den Gestaltungsprozess heißt dies, dass die vorhandenen Lösungen in die erarbeitete Produktstruktur eingebracht werden müssen. Die fehlenden Bauteile und Baugruppen werden dann konstruktiv integriert. Dabei sollten vorhandene Elemente möglichst nicht verändert werden. In Abb. 10.4 sind die Hauptschritte des Gestaltungsprozesses wiedergegeben.

Auch hier ist in der Praxis eine eindeutige Trennung der Schritte nicht immer möglich und Iterationen notwendig. Durch den Prozess mit seinen einzelnen Schritten werden

**Abb. 10.4** Die Hauptschritte des Gestaltungsprozesses



**Abb. 10.5** Wirkkonzept eines zweistufigen Getriebes



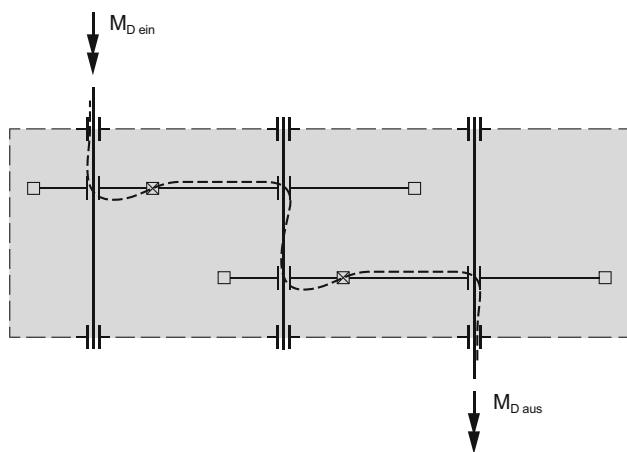
aber mindestens ein gezieltes Hinterfragen von Ergebnissen und das Erkennen möglicher Probleme gefördert. Im Folgenden sollen die einzelnen Schritte dargestellt werden.

### 10.2.1 Arbeitsschritt 1: Produktstruktur in Wirkkonzept kennzeichnen

Mit Hilfe der Produktstruktur wird beschrieben, in welche Bauteile und Baugruppen das Produkt aufgeteilt werden soll. Die zweite Eingangsgröße dieses Arbeitsschritts stellt das Wirkkonzept dar. Wie in Abschn. 10.1 beschrieben, gibt es die genutzten physikalischen Effekte und die prinzipiell vorgesehenen Werkstoffe zur Funktionserfüllung wieder. Dabei sind die einzelnen Elemente über ihre Wirkflächen miteinander verknüpft. In Abb. 10.5 ist das Wirkkonzept eines zweistufigen Getriebes dargestellt.

Zu erkennen sind die Eingangs-, Zwischen- und die Ausgangswelle. Das Gehäuse ist gestrichelt dargestellt. Das Konzept beinhaltet keine Aussage, wie die Wellen gelagert werden, oder wie die Welle-Nabe-Verbindungen zu gestalten sind. Bei diesen ist der genutzte

**Abb. 10.6** Wirkkonzept des Getriebes mit eingezeichnetem Verlauf des Hauptflusses (Strichlinie)



physikalische Effekt noch offen. Je nach Belastungsart und Aufgabe des Getriebes sind unterschiedliche Prinzipien sinnvoll.

### 10.2.2 Arbeitsschritt 2: Hauptfluss durch das Wirkkonzept eintragen

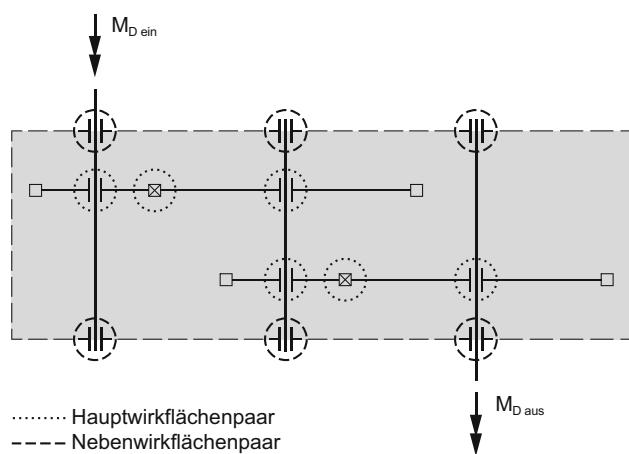
Gemäß Abb. 10.4 wird im zweiten Schritt der Hauptfluss des Produkts eingezeichnet. Der Hauptfluss ist in diesem Beispiel das Drehmoment. In Abb. 10.6 ist dessen Verlauf durch die Strichlinie dargestellt. Hierdurch werden im nächsten Schritt die an der Übertragung des Hauptflusses beteiligten Wirkflächenpaare deutlich.

### 10.2.3 Arbeitsschritt 3: Am Hauptfluss beteiligte Wirkflächen kennzeichnen

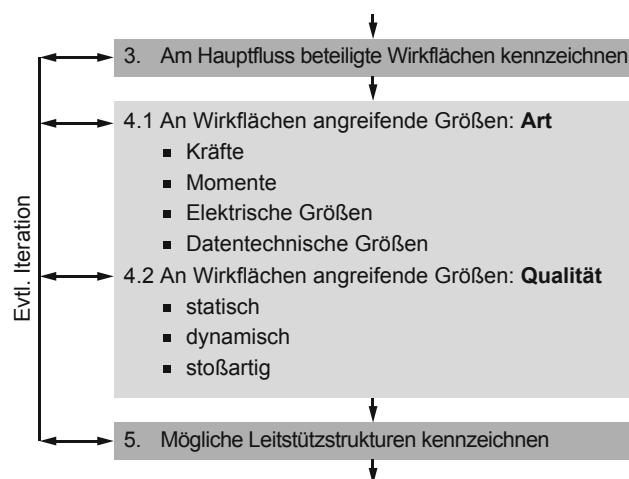
Nun werden bei diesem Arbeitsschritt die an der Übertragung des Hauptflusses beteiligten Wirkflächenpaare gekennzeichnet. Bei diesem Beispiel wird deutlich, dass neben den Hauptwirkflächen, die direkt an der Übertragung beteiligt sind, auch Nebenwirkflächen beachtet werden müssen. Diese leiten in diesem Fall die Reaktionskräfte aus den Hauptwirkflächen. In Abb. 10.7 sind die Hauptwirkflächenpaare durch Punktlinien und die Nebenwirkflächen durch Strichlinien gekennzeichnet.

Für die Gestaltung dieser Wirkflächenpaare müssen nun Lösungen erarbeitet werden. Wie oben erläutert, ist es z. T. sinnvoll, diese Lösungen möglichst lange offenzuhalten. So kann die Auswahl eines geeigneten physikalischen Prinzips von übergeordneten Kriterien abhängen, wie bei den Erläuterungen zu Arbeitsschritt 6 gezeigt wird.

**Abb. 10.7** Wirkkonzept mit den gekennzeichneten Haupt- und Nebenwirkflächen

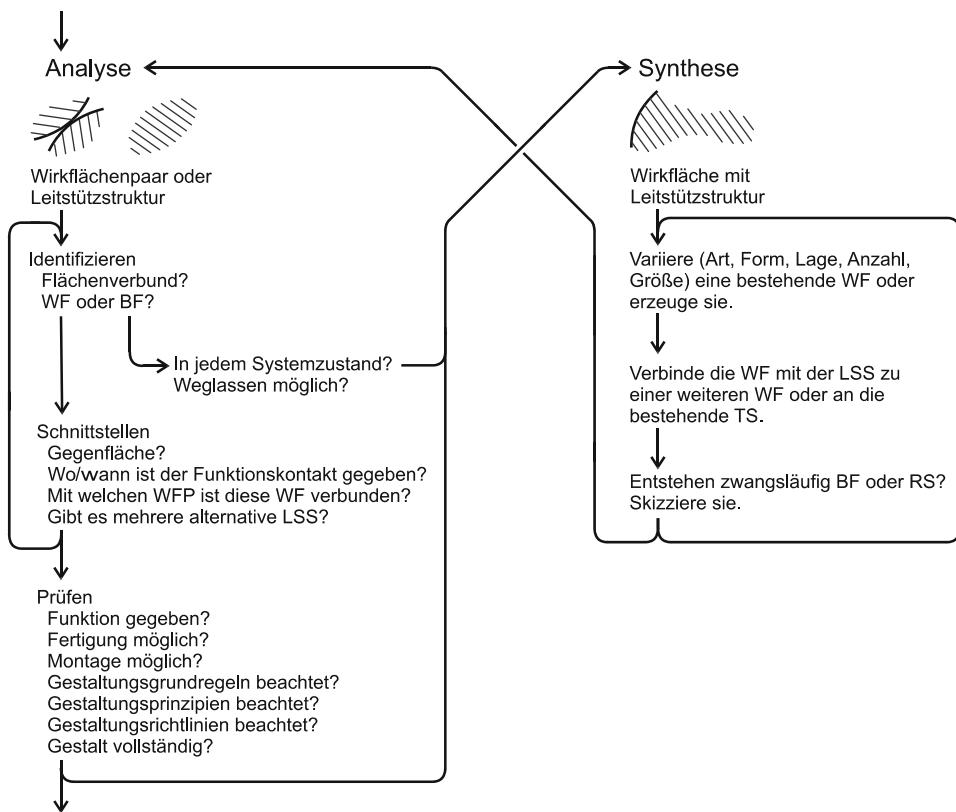


**Abb. 10.8** Ermittlung der an den Wirkflächen angreifenden Größen



#### **10.2.4 Arbeitsschritt 4: An Wirkflächen angreifende Größen ermitteln**

Im Verlauf dieses Arbeitsschritts sind notwendigerweise eine Reihe von z. T. detaillierten Untersuchungen und Berechnungen erforderlich. In dem hier betrachteten Beispiel des Getriebes muss z. B. der Werkstoff für die Wellen zumindest soweit festgelegt werden, dass Aussagen über seine Gestaltbarkeit und Festigkeit möglich sind. Da, wie oben erläutert, die Betrachtungsrichtung „von innen nach außen“ ist, müssen also zunächst die Wellen, dann die Zahnräder und Lager bestimmt werden. Diese ersten gestalterischen Festlegungen bestimmen dann wiederum die an den Wirkflächen angreifenden Größen. Insbesondere bei der Konstruktion rein mechanischer Produkte ist dieser Arbeitsschritt durch häufige Iterationen gekennzeichnet. Abbildung 10.8 gibt eine Übersicht über die zu ermittelnden Größen wieder.



**Abb. 10.9** Systematische Gestaltsynthese (nach Lemburg 2009)

### 10.2.5 Arbeitsschritt 5: Mögliche Leitstützstrukturen kennzeichnen

Nachdem die an den Wirkflächenpaaren angreifenden Größen bestimmt sind, müssen nun die einzelnen Wirkflächen untereinander verknüpft werden, damit der Hauptfluss durch das Produkt fließen kann. Um diese Verknüpfungen darzustellen, kann die Leitstützstruktur genutzt werden, s. Abb. 10.1. Im vorliegenden Beispiel kann für eine erste Festlegung der eingezeichnete Verlauf des Hauptflusses, hier Kräfte und Momente, genutzt werden, s. Abb. 10.6. Für die eigentliche Gestaltung schlägt Lemburg (Lemburg 2009) den in der Abb. 10.9 dargestellten Ablauf vor.

Das Wesentliche besteht in dem kontinuierlichen Wechsel zwischen Kreation, also der Synthese, und der kritischen Prüfung der Lösung, der Analyse.

### 10.2.6 Arbeitsschritt 6: Klären weiterer Anforderungen

Nach der Durchführung des fünften Arbeitsschritts liegen Entwürfe für wesentliche Teile des Produkts vor. Bevor im letzten Arbeitsschritt der vollständige Entwurf erstellt wird, müssen alle Anforderungen an die Gestaltung bekannt sein. Diese können aus dem eigenen Unternehmen kommen, z. B. durch Standardhalbzeuge, die verwendet werden müssen, oder sie resultieren aus dem Lebenslauf des Produkts. So hat die Forderung nach einfacher Wartbarkeit und Reparatur eines Produkts großen Einfluss auf die Gestaltung. Fehler müssen leicht erkennbar, z. B. durch Öffnen von Wartungsklappen, und Verschleißbauteile leicht austauschbar sein. Bei dem hier behandelten Beispiel kann es z. B. deshalb sinnvoll sein, formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen für die Zahnräder einzusetzen, da diese einen Tausch der Zahnräder vereinfachen. Gleiches gilt für die Gestaltung der Lagerstellen. Hier kann durch eine Integration eines Lagers in einen Lagerdeckel die Reparatur vereinfacht werden.

Prinzipiell sollten aber eine Reihe von Kriterien beachtet werden, um eine zweckmäßige Konstruktion sicherzustellen. In Abb. 10.10 ist eine Leitlinie für das Gestalten wiedergegeben.

### 10.2.7 Arbeitsschritt 7: Erster Entwurf

Nach der Ausführung der oben erläuterten Schritte kann der Gesamtentwurf erstellt bzw. vervollständigt werden. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass in der Entwurfspraxis der geschilderte Prozess sehr iterativ verläuft und der ständige Wechsel zwischen der Synthese einer Lösung und der Analyse, ob sie die Anforderungen erfüllt, sehr wichtig ist.

### 10.2.8 Der Gestaltungsprozess in der Praxis (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Neben den im Abschn. 10.2.7 gemachten Bemerkungen hat sich in der Praxis noch das im Folgenden erläuterte Vorgehen bewährt. Bei einem Produkt gibt es hinsichtlich der Gestaltung immer Bereiche, die einfach zu beherrschen sind, und anspruchsvolle Bereiche. Es hat sich bewährt, beim ersten vollständigen Entwurf zu analysieren, in welchen seiner Bereiche aus verschiedenen Gründen Probleme zu erwarten sind. Mit diesen Stellen sollte sich zuerst befasst und zumindest eine grobe Lösung erarbeitet werden. Anders ausgedrückt, lautet die Vorgehensweise beim Gestalten: „vom Schwierigen zum Einfachen“. So wird verhindert, dass erst in einem fortgeschrittenen Konstruktionsstadium unüberwindbare Probleme erkannt werden.

Im Folgenden soll an einem relativ einfachen Beispiel die Vorgehensweise erläutert werden. Es handelt sich dabei um den Rahmen für eine Vibrationsschweißanlage zur Herstellung von Ansaugkrümmern aus Kunststoff für Pkw-Motoren. Die obere und untere Hälfte des Ansaugkrümmers werden mittels mechanischer Energie an ihren Berührungsstellen erwärmt und verschmelzen dort miteinander. Dazu werden die Hälften in einen

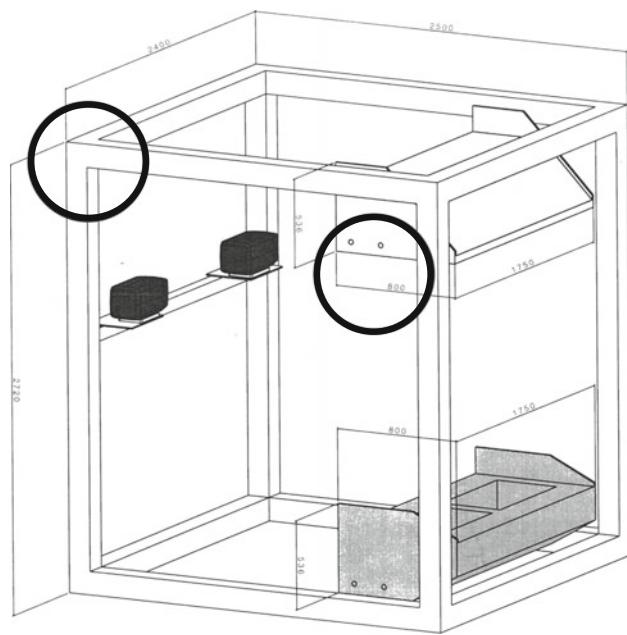
Hauptmerkmal	Beispiele
Funktion	Wird die vorgesehene Funktion erfüllt ? Welche Nebenfunktionen sind erforderlich ?
Wirkprinzip	Bringen die gewählten Wirkprinzipien den gewünschten Effekt, Wirkungsgrad und Nutzen ? Welche Störungen sind aus dem Prinzip zu erwarten ?
Auslegung	Garantieren die gewählten Formen und Abmessungen mit dem vorgesehenen Werkstoff bei der festgelegten Gebrauchszeit und unter der auftretenden Belastung ausreichende Haltbarkeit, zulässige Formänderung, genügende Stabilität, genügende Resonanzfreiheit, störungsfreie Ausdehnung, annehmbares Korrosions- und Verschleißverhalten ?
Sicherheit	Sind die Betriebs-, Arbeits- und Umweltsicherheit beeinflussenden Faktoren berücksichtigt ?
Ergonomie	Sind die Mensch-Maschine-Beziehungen beachtet ? Sind Belastungen, Beanspruchungen und Ermüdung berücksichtigt ? Wurde auf gute Formgebung (Design) geachtet ?
Fertigung	Sind Fertigungsgesichtspunkte in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht berücksichtigt ?
Kontrolle	Sind die notwendigen Kontrollen während und nach der Fertigung oder zu einem sonst erforderlichen Zeitpunkt möglich und als solche veranlasst ?
Montage	Können alle inner- und außerbetrieblichen Montagevorgänge einfach und eindeutig vorgenommen werden ?
Transport	Sind inner- und außerbetriebliche Transportbedingungen und -risiken überprüft und berücksichtigt ?
Gebrauch	Sind alle beim Gebrauch oder Betrieb auftretenden Erscheinungen, wie z.B. Geräusch, Erschütterung, Handhabung in ausreichendem Maße beachtet ?
Instandhaltung	Sind die für eine Wartung, Inspektion und Instandsetzung erforderlichen Maßnahmen in sicherer Weise durchführ- und kontrollierbar ?
Recycling	Ist Wiederverwendung oder -verwertung ermöglicht worden ?
Kosten	Sind vorgegebene Kostengrenzen einzuhalten ? Entstehen zusätzliche Betriebs- oder Nebenkosten ?
Termin	Sind die Termine einhaltbar ? Gibt es Gestaltungsmöglichkeiten, die die Termsituation verbessern können ?

**Abb. 10.10** Leitlinie mit Hauptmerkmalen beim Gestalten

oberen und unteren Formträger aufgenommen, die jeweils ein Gewicht von ca. 300 kg haben. In Abb. 10.11 ist die Anlage in ihrer ersten Grobgestaltung mit den Hauptkomponenten wiedergegeben. Beispielhaft sind einige kritische Bereiche der Rahmenkonstruktion durch Kreise gekennzeichnet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Grobgestaltung von Produkten sind die elektrischen und hydraulischen Anschlüsse. Die allerwenigsten Maschinen und Anlagen kommen heute noch ohne Sensoren und Aktoren für ihre Steuerung und Regelung aus. Diese Kom-

**Abb. 10.11** Grobgestaltung des Rahmens einer Vibrationsschweißanlage mit den Hauptkomponenten



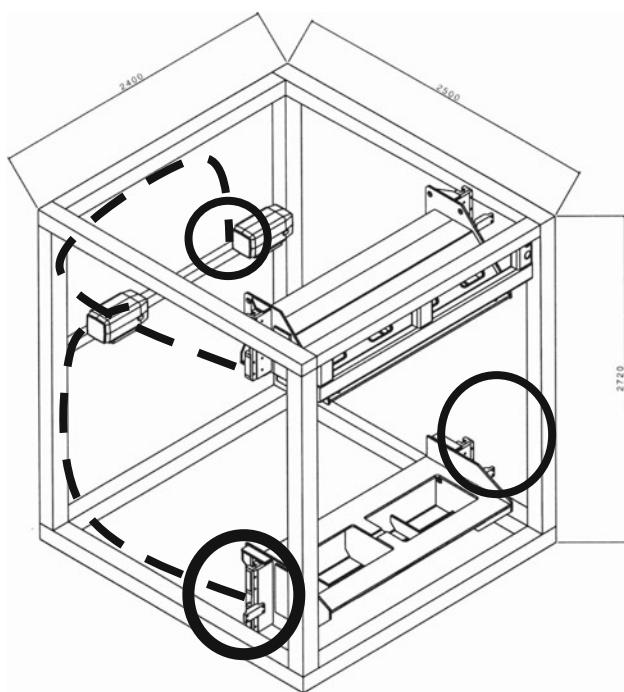
ponenten müssen frühzeitig berücksichtigt werden, da ihre Einbaulage häufig bestimmten Regeln genügen muss. Gleiches gilt auch für ihre Anschlüsse und Verdrahtung bei den elektrischen und insbesondere elektronischen Komponenten. Hier ist eine Reihe von Einflüssen zu berücksichtigen, wie z. B.

- Wärmeentwicklung und Kühlung elektrischer Komponenten,
- Schwingungsanregung durch elektrische Komponenten großer Leistung, häufig ist auch eine entsprechende Geräuschentwicklung zu berücksichtigen,
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), mit entsprechenden Maßnahmen zur Erdung, Schirmung und Filterung elektrischer Leitungen und Komponenten,
- Prüfbarkeit in eingebautem Zustand,
- Austauschbarkeit und
- zulässige Biegeradien für Kabelbündel.

Deshalb ist es sinnvoll, in einer weiteren Detaillierungsstufe zunächst die Hauptkomponenten der Anlage mit ihren entsprechenden Anschlüssen zu berücksichtigen und, zumindest grob, die notwendigen elektrischen Verbindungen festzulegen. In Abb. 10.12 ist die nächste Detaillierungsstufe der Beispielanlage wiedergegeben. Es sind Anschlüsse durch Kreise und mögliche Leitungsverbindungen durch gestrichelte Linien beispielhaft gekennzeichnet.

Die gesamte Konstruktion befindet sich bereits in einem mittleren Detaillierungsgrad, und es geht nun darum, Lösungen für die Rahmenecken zu erarbeiten.

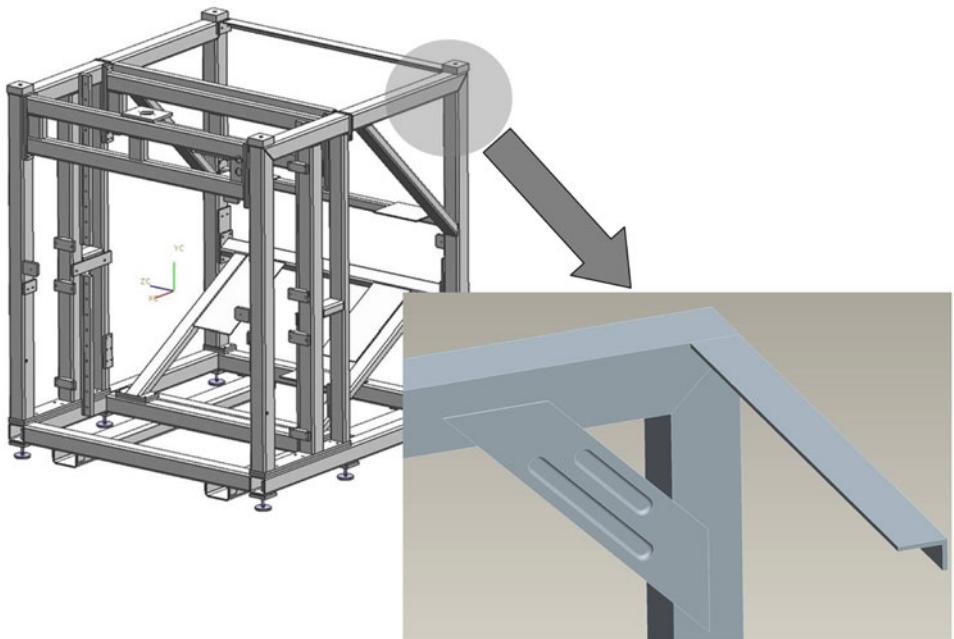
**Abb. 10.12** Weitere Detaillierungsstufe des Beispiels, wobei die Hauptkomponenten mit ihren Anschlüssen wiedergegeben sind



Beim Gestalten ist grundsätzlich eine Reihe von Kriterien zu beachten, wie sie in Abb. 10.9 wiedergegeben sind. Die Abbildung verdeutlicht den sinnvollen und ständigen Wechsel zwischen Analyse und Synthese beim Gestalten. Damit ist die kritische Überprüfung eines ausgeführten Gestaltungsbereichs gemeint, z. B., ob der vorgegebene Kostenrahmen einhaltbar ist oder die Funktion sicher erfüllt wird. Bei vorhandenen Defiziten wird dann die Gestaltung auf Basis der Erkenntnisse aus der Analyse gezielt verbessert, bis das Ergebnis befriedigend ist. In Abb. 10.13 ist der auskonstruierte Rahmen der Vibrationsschweißanlage dargestellt.

### 10.3 Zusammenfassung

Die oben beschriebene Methodik führt ausgehend von einer möglichen ersten spontanen Idee (opportunistisches Prinzip) durch gezielte Analyse der gefundenen Lösungen zu einer anwendbaren Gestaltung des Produkts. Unterstützt wird die Lösungsfundung durch die methodische Analyse der Vorgänge im Produkt zur Funktionserfüllung. Ausgehend vom gefundenen Konzept werden dabei die möglichen Pfade des Hauptflusses durch das Produkt analysiert und so der erforderliche Werkstoff zwischen den Wirkflächen zweckmäßig angeordnet.



**Abb. 10.13** Beispiel für das Vorgehen beim Konstruieren: „vom Schwierigen zum Einfachen“

Allerdings ist für eine entsprechende Optimierung eine Reihe von Gestaltungsregeln anzuwenden, welche sowohl die Funktionssicherheit, als auch die kostengünstige Produktion des Produkts unterstützen. Diese Gestaltungsregeln werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

---

## Literatur

- Albers A, Matthiesen S (2002) Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme. Konstruktion 54(7/8):55–60
- Koller R (1998) Konstruktionslehre für den Maschinenbau, 4. Aufl. Springer, Berlin
- Lemburg JP (2009) Methodik der schrittweisen Gestaltungsynthese. Dissertation an der RWTH Aachen, in Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Bd 06
- Matthiesen S (2002) Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. IPEK Forschungsberichte, Bd 6. Karlsruhe

Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote und Alfred Neudörfer

Durch den in Abschn. 9.4.1 beschriebenen Top-Down-Prozess werden die Produktgliederung sowie die Hauptchnittstellen der Produktkomponenten, Baugruppen und Bauteile prinzipiell definiert. Auch die Beziehung der Komponenten untereinander wird entsprechend festgelegt. Die dabei zu beachtenden Kriterien geben bereits eine Reihe von Hinweisen bzw. Vorgaben für die Gestaltung des Produkts. Mit dem Gestaltkonzept als Hauptteil des Produktkonzepts werden dann wesentliche geometrische Eigenschaften des Produkts bestimmt, sodass eine Grobgestalt des Produkts vorliegt. Damit das Produkt und alle seine Einzelteile hergestellt werden können, muss jedes noch so kleine Volumenelement hiervon eindeutig beschrieben sein. Diese Feingestaltung schließt sich an die nach Kap. 10 durchgeführten Arbeitsschritte an.

Es ist leicht einsichtig, dass es in Abhängigkeit z. B. vom gewählten Werkstoff, den Abmessungen eines Bauteils, dem geplanten Fertigungsprozess usw. eine Reihe von zu beachtenden Regeln und Richtlinien gibt, damit ein Bauteil nicht nur grundsätzlich, sondern auch so funktionssicher und kostengünstig wie möglich produziert werden kann. Bei

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

A. Neudörfer

Akademischer Direktor a. D., Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren,  
Technische Universität Darmstadt,  
Magdalenenstraße 2, 64289 Darmstadt, Deutschland  
E-Mail: a.neudoerfer@gmx.de

diesen Überlegungen treten hinsichtlich der Gestaltung bereits Widersprüche auf, da sich häufig hohe Funktionssicherheit, z. B. aufgrund hoher Werkstoffqualität und Fertigungsgenauigkeit, und geringe Kosten ausschließen. Es muss also im Einzelfall entschieden werden, wenn nicht durch eine entsprechende Gestaltung beide Kriterien erfüllt werden können.

In den folgenden Kapiteln werden Gestaltungshinweise gegeben, die möglichst beide der o. g. Hauptkriterien berücksichtigen. Es wird dabei unterschieden zwischen:

- Grundregeln der Gestaltung: Sie sind immer anzuwenden und führen im Allgemeinen zu funktionssicheren und kostengünstigen Produkten.
- Gestaltungsprinzipien: Sie unterstützen eine funktionssichere und kostengünstige Gestaltung unter Berücksichtigung besonderer Aspekte, wie z. B. das Leiten von Kräften, thermische Einflüssen auf ein Produkt usw.
- Gestaltungsrichtlinien: Sie sind bei bestimmten Bedingungen für das Produkt anwendbar.

In der Praxis gibt es viele Produkte, bei denen nicht nach den o. g. Gestaltungsregeln vorgegangen wurde. Dies kann verschiedene Gründe haben, insbesondere sind hier die Kosten zu nennen. Diese stehen bei Massenprodukten im Vordergrund. In Relation zu Investitionsgütern ist die Lebensdauer von Konsumgütern gering. Deshalb kommen bei diesen Produkten teilweise konstruktive Ausführungen und Gestaltungen zum Einsatz, die den üblichen, hier dargestellten Regeln widersprechen. Trotzdem erfüllen diese Produkte die Lebensdauererwartungen der Kunden und sind funktionssicher. Häufig sind die in den genannten Fällen angewendeten Gestaltungsprinzipien auf umfangreichen Erfahrungen in der Produktion und mit der Nutzung der Produkte durch die Kunden entstanden. Sie sind deshalb meistens produkt- und unternehmensspezifisch, können also, im Gegensatz zu den im Folgenden dargestellten Gestaltungsregeln, nicht verallgemeinert werden.

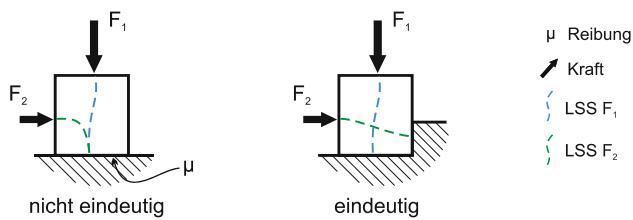
Die Grundregeln der Gestaltung sind ohne Einschränkung anwendbar. Diese Aussage gilt durchaus auch für den Aspekt der Kosten, da insbesondere die Grundregel „einfach“ auch zu kostengünstigen Lösungen führt. Gleches gilt auch für „eindeutig“, da z. B. eindeutig montierbare Bauteile auch kostengünstige Montageprozesse zur Folge haben. Verwechselungen der Montagerichtung werden beispielsweise ausgeschlossen und Nacharbeiten entfallen, werden zumindest aber reduziert. Die Sicherheit und damit die dritte Grundregel der Gestaltung „sicher“, ist vor dem erhöhten Sicherheitsbewusstsein der Kunden und in Folge von Fragen der Produkthaftung von sehr hoher Priorität. Sicher meint hier nicht nur Sicherheit im Sinne eines unversehrten Nutzers und Umwelt, sondern auch im Sinne von Funktionssicherheit. Letztere ist eine Voraussetzung für zufriedene Kunden und trägt damit zum langfristigen Bestehen eines Unternehmens bei.

---

## 11.1 Eindeutig (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Die Problematik der Eindeutigkeit wird sehr anschaulich durch Abb. 11.1 wiedergegeben. Die radiale und axiale Fixierung des symbolisch dargestellten Bauteils ist auf der linken Seite der Abbildung in axialer Richtung aufgrund der Reibverhältnisse nicht eindeutig gegeben.

**Abb. 11.1** Eindeutigkeit am Beispiel radialer und axialem Abstützung (nach Leinburg 2009)



Anders sind die Verhältnisse auf der rechten Seite. Sowohl für die radiale, als auch für die axiale Fixierung wird ein Formschluss genutzt.

Anhand des Leitlinie sollen die Zusammenhänge umfassend betrachtet werden:

**Funktion** Innerhalb einer Funktionsstruktur muss eine

- klare *Zuordnung* der Teilfunktionen mit zugehörigen Eingangs- und Ausgangsgrößen sichergestellt werden.

**Wirkprinzip** Das gewählte Wirkprinzip muss

- hinsichtlich der physikalischen Effekte beschreibbare Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung aufweisen,

damit richtig und wirtschaftlich ausgelegt werden kann. Die aus einzelnen Wirkprinzipien aufgebaute Wirkstruktur muss

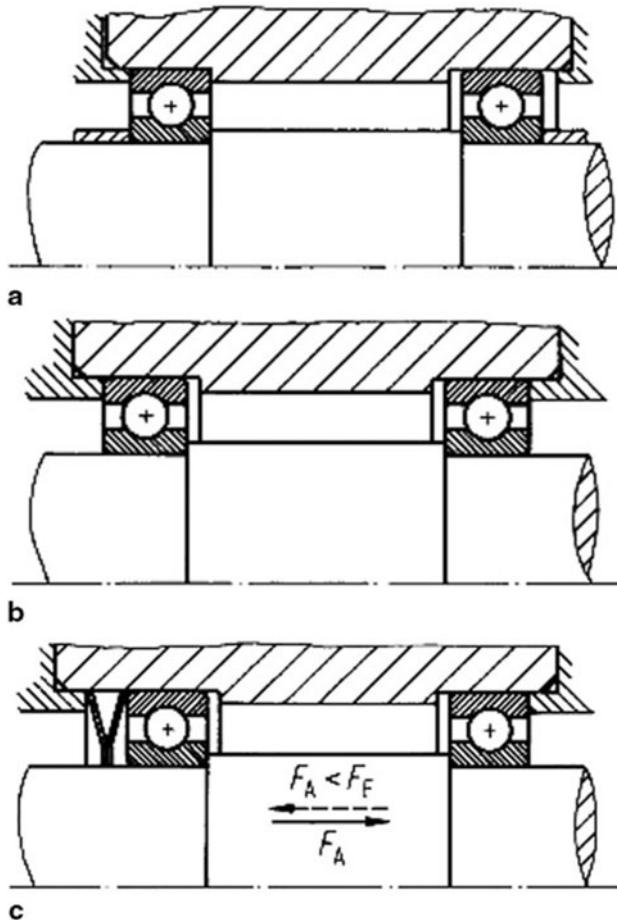
- eine *geordnete* Führung des Energie- bzw. Kraftflusses, des Stoff- und Signalflusses sicherstellen,

da es andernfalls zu ungewollten und unübersehbaren Zwangszuständen mit erhöhten Kräften, Verformungen und möglicherweise raschem Verschleiß kommt. Unter Beachtung der mit der Belastung zwangsweise verbundenen Verformungen sowie den Ausdehnungen unter Temperatur müssen

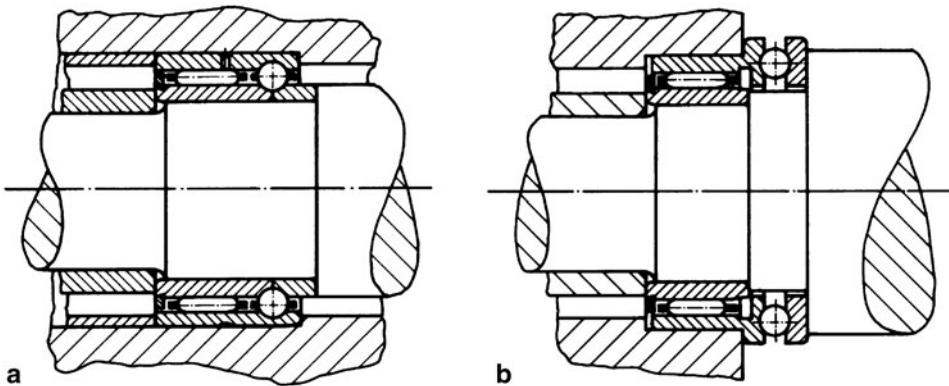
- definierte Dehnungsrichtungen und -möglichkeiten konstruktiv vorgesehen werden.

Bekannt sind die sich eindeutig verhaltenden Fest- und Loslageranordnungen nach Abb. 11.2a. Sogenannte Stützlageranordnungen (s. Abb. 11.2b) dürfen dagegen nur vorgesehen werden, wenn die zu erwartenden Längenänderungen vernachlässigbar klein sind oder ein entsprechendes Spiel in der Lagerung zulässig ist. Mittels elastischer Verspannung, wobei die betriebsbedingte Axialkraft  $F_A$  die Vorspannkraft  $F_F$  nicht übersteigen darf, kann dagegen eine eindeutig definierte Lasthöhe sichergestellt werden, s. Abb. 11.2c.

Kombinierte Lageranordnungen sind oft problematisch. Die Lagerkombination in Abb. 11.3a besteht aus einem Nadellagerteil, das die Radialkräfte, und einem Kugellagerteil,



**Abb. 11.2** Grundsätzliche Lageranordnungen. **a** Fest- und Loslageranordnung, linkes Festlager nimmt allein alle Axialkräfte auf, rechtes Loslager gestattet ungehinderte Axialbewegung infolge Wärmedehnung, Berechnungsmöglichkeit eindeutig. **b** Stützlageranordnung, keine klare Zuordnung, da Axialbelastung der Lager von der Anstellung (Vorspannung) abhängig ist und Kräfte infolge Wärmedehnung nicht eindeutig beschreibbar sind: Abwandlung ist die „schwimmende Anordnung“, bei der die Lager z. B. am Gehäuse mit Axialluft eingesetzt werden; Wärmedehnung ist dann begrenzt möglich, es besteht aber keine eindeutige Wellenlage. **c** elastisch verspannte Lager, Nachteile der Stützlageranordnung werden weitgehend aufgehoben, die dauernd aufgebrachte axiale Vorspannkraft wirkt u. U. lebensdauermindernd; Kräfte aus Wärmedehnung sind über Kraft-Federweg-Diagramm eindeutig beschreibbar: Wellenlage eindeutig, solange Axialkraft  $F_A$  nur nach rechts wirkt oder die Vorspannkraft  $F_F$  nicht übersteigt



**Abb. 11.3** Kombiniertes Wälzlager. **a** Übernahme der Radialkräfte nicht eindeutig; **b** kombinierter Wälzlager mit ähnlichen Elementen wie bei a), aber eindeutige Kraftleitung der Radial- und Axialkräfte

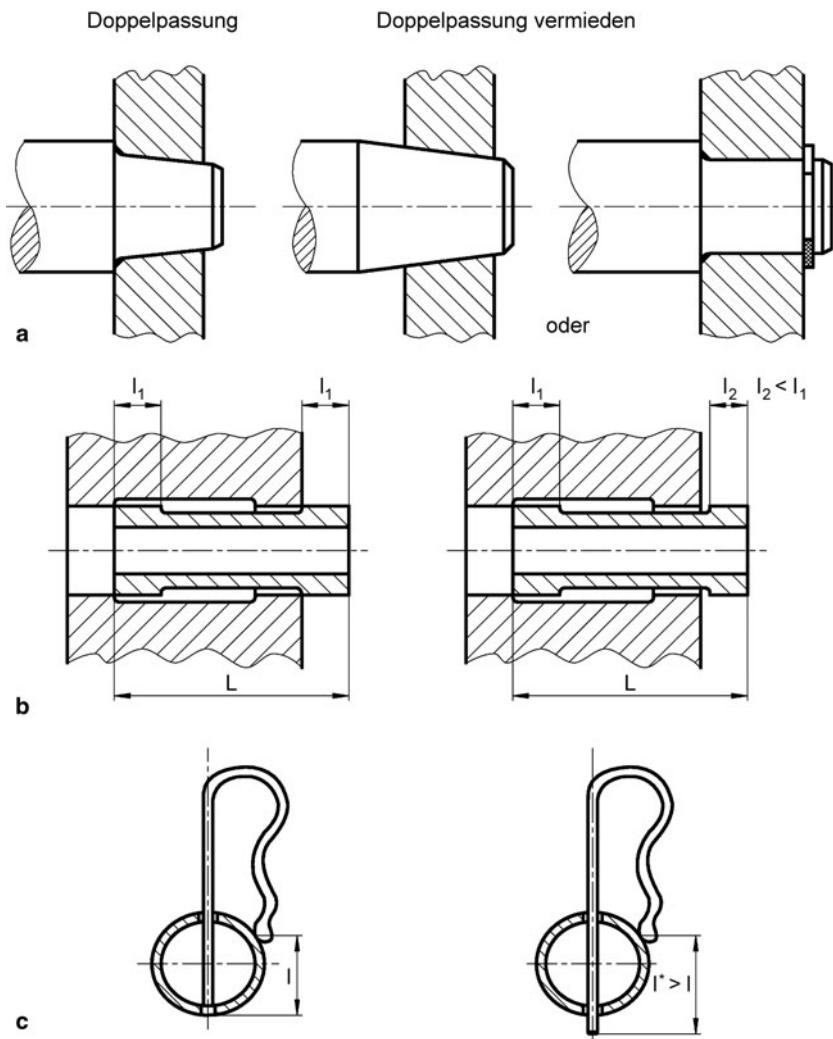
das die Axialkräfte übernehmen soll. Die gewählte Anordnung gestattet aber keine eindeutige Radialkraftübernahme, da sowohl der gemeinsame Innen- als auch der gemeinsame Außenring beide Wälzkörper abstützen und so der Kraftleitungsweg nicht klar definierbar ist. Unsicherheiten in der Auslegung oder Lebensdauer sind die Folge. Die Anordnung in Abb. 11.3b folgt dagegen mit ähnlichen Elementen der Regel „eindeutig“, wenn der Konstrukteur beim Einbau dafür sorgt, dass der rechte Lagerring dem Stützkörper gegenüber stets ausreichendes Radialspiel erhält und so das Kugellager ausschließlich nur Axialkräfte übernimmt.

*Probleme mit Doppelpassungen:* Gegen die Grundregel „eindeutig“ verstoßen sog. Doppelpassungen. Unter einer Doppelpassung wird eine gleichzeitige Abstützung oder Führung an zwei Stellen verstanden, die jeweils entweder in verschiedenen Ebenen oder auf verschiedenen Zylindermantelflächen liegen. Solche Abstützungen oder Führungen befinden sich dann nicht auf der gleichen Bearbeitungsebene und weisen toleranzbedingt Maßunterschiede auf, die dazu führen, dass der Kraftleitungsweg nicht eindeutig beschrieben werden kann oder die Montage durch Undeutlichkeiten erschwert wird. Auch wenn durch eine neuzeitliche Fertigungstechnik Toleranzprobleme entschärft werden, verbleiben Uneindeutigkeiten hinsichtlich der Funktionserfüllung und bei der Montage.

Die Erscheinungsformen von Doppelpassungen sind sehr vielfältig. Abb. 11.4 zeigt unterschiedliche Fälle solcher Doppelpassungen und zugehörige Lösungen, um Doppelpassungen zu vermeiden.

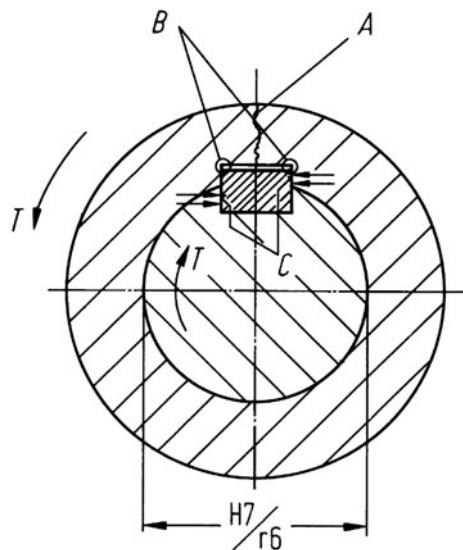
**Auslegung** Zur Auslegung und Werkstoffwahl ist die Kenntnis eines

- eindeutig *definierten* Lastzustands nach Größe, Art und Häufigkeit oder Zeit unumgänglich.



**Abb. 11.4** Vermeiden von Doppelpassungen. **a** Welle-Nabe-Verbindung mit Kegelsitz und aufgepresster (aufgeschrumpfter) Nabe. Die gleichzeitige axiale Anlage am Wellenbund ruft gegenüber dem Kegelsitz eine Doppelpassung hervor. Die aufgebrachte radiale Presskraft ist damit ungewiss. Richtige Lösung: alleiniger Kegelsitz oder zylindrischer Sitz mit Wellenbund nach DIN. **b** Abgestützte Gleitführung mittels Führungsbuchse in einem Gehäuse mit maßlich identischen Absätzen. Das gleichzeitige Anliegen an den Kanten erschwert den Montagevorgang. Richtige Lösung: erst linken Absatz einführen, dann den rechten folgen lassen. **c** Federnder Splint mit einer Splintlänge, bei der das untere Ende des Splints an die Rohrwand stößt und gleichzeitig der Federdruckpunkt zur Wirkung kommt. Benutzer weiß nicht, ob Splint von der Rohrwand blockiert wird oder ob schon der Federdruck überwunden werden muss. Richtige Lösung: Splintlänge so groß, dass Splint erst einwandfrei ins untere Splintloch geführt wird und dann die Federkraft zur Wirkung kommt

**Abb. 11.5** Kombinierte, nicht eindeutige Welle-Nabe-Verbindung mittels Querpressverband und Passfeder



Fehlen solche Angaben, muss unter zweckmäßigen Annahmen ausgelegt und danach eine erwartete Lebensdauer oder Betriebszeit ggf. nach Betriebsfestigkeitsprüfungen angegeben werden.

Aber auch die Gestaltung sollte so gewählt werden, dass

- sich stets zu allen Betriebszuständen ein beschreibbarer Beanspruchungszustand ergibt, der in entsprechender Weise berechnet werden kann und
- Zustände, die die Funktion beeinträchtigen sowie die Haltbarkeit des Bauteils in Frage stellen können, nicht zugelassen werden dürfen.

In ähnlicher Weise muss eindeutiges Verhalten hinsichtlich Stabilität, Resonanzlagen, Verschleiß und Korrosionsverhalten überprüft werden.

Sehr oft findet man *Doppelanordnungen*, die „zur Sicherheit“ vorgenommen werden, aber nicht eindeutig sind. So wird eine Welle-Nabe-Verbindung, die man als Querpressverband konzipiert hat, mit einer zusätzlichen Passfederverbinding nicht tragfähiger, s. Abb. 11.5. Das zusätzliche formschlüssige Element sorgt nur für eine Positionstreue in Umfangsrichtung, vermindert aber infolge Querschnittsschwächung bei A und einer jetzt merklich hohen Kerbwirkung bei B die Haltbarkeit in drastischer Weise. Zudem wird eine Haltbarkeitsberechnung wegen des komplizierten Beanspruchungszustands bei C in der Nähe der Krafteinleitung nicht sicher voraussagbar. Schmid (1969) wies darauf hin, dass z. B. bei einem Kegelpressverband mit axialer Vorspannung zur Torsionsübertragung eine schraubenförmige Aufschubbewegung der Nabe auf der Welle für einen tragfähigen Schrumpfsitz notwendig ist und mit einer formschlüssigen Passfeder zum Nachteil der Verbindung unterbunden würde. Die volle Ausschöpfung des Querpressverbandes zu einer

höheren Tragfähigkeit ist nur unter Weglassung der Passfeder möglich. Die Lösung nach Abb. 11.5 ist allein akzeptabel, wenn die Positionstreue der Nabe gegenüber der Welle der Wesenskern der Aufgabe ist, dann wäre aber ein normaler Wellensitz angebrachter.

**Ergonomie** Bei der Mensch-Maschine-Beziehung sollen

- Reihenfolge und Ausführung der Bedienung mittels entsprechender Anordnung und Schaltungsart in folgerichtiger Weise erzwungen werden.

**Fertigung und Kontrolle** Diese sollen anhand eindeutiger und vollständiger Angaben im rechnerinternen Produktmodell sowie in Zeichnungen, Stücklisten und Anweisungen erleichtert werden.

Der Konstrukteur darf sich nicht scheuen, die Erfüllung der festgelegten Ausführungsmerkmale ggf. in Form besonderer organisatorischer Maßnahmen, z. B. Protokolle usw., von der Fertigung zu fordern.

**Montage und Transport** Ähnliches gilt für Montage- und Transportvorgänge. Eine zwangsläufige und Irrtümer ausschließende Montagefolge sollte aufgrund der konstruktiven Gestaltung gegeben sein.

**Gebrauch und Instandhaltung** Hierfür sollten ein eindeutiger Aufbau und die entsprechende Gestaltung dafür sorgen, dass

- Betriebsergebnisse übersichtlich anfallen und kontrollierbar sind,
- Inspektionen und Wartungen mit möglichst wenig unterschiedlichen Hilfsstoffen und Werkzeugen ausführbar sind,
- Inspektions- und Wartungsmaßnahmen hinsichtlich Zeitpunkt und Umfang klar definiert sind und
- Inspektionen und Wartungen nach ihrer Durchführung eindeutig kontrolliert werden können.

**Recycling** Hierfür sollten

- eindeutige Trennstellen zwischen verwertungsunverträglichen Werkstoffen

sowie

- eindeutige Montage- und Demontagefolgen

vorgesehen werden.

## 11.2 Einfach (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Unter dem Stichwort „einfach“ findet man in Lexika die Begriffe: „nicht zusammengesetzt“, aber auch „übersichtlich“, „leicht verständlich“, „schlicht“ und „ohne Aufwand“. Für die technische Anwendung sind hier wichtig: nicht zusammengesetzt, übersichtlich, geringer Aufwand.

Eine Lösung erscheint uns einfacher, wenn sie mit wenigen Komponenten oder Teilen verwirklicht werden kann, weil die Wahrscheinlichkeit, z. B. geringere Bearbeitungskosten, weniger Verschleißstellen und kleineren Wartungsaufwand zu erzielen, dann größer ist. Dies trifft aber nur zu, wenn bei wenigen Komponenten oder Teilen ihre Anordnung und ihre geometrische Form einfach bleiben können. Möglichst wenige Teile mit einfacher Gestaltung sind daher grundsätzlich anzustreben (Leyer 1978; Niemann 2001; Pahl 1963).

In der Regel muss aber ein Kompromiss geschlossen werden. Die Erfüllung der Funktion erfordert stets ein Mindestmaß an Komponenten oder Teilen. Eine wirtschaftliche Fertigung sieht sich oft der Notwendigkeit gegenüber, zwischen mehreren Teilen mit einfacher Form, aber mit größerem Bearbeitungsaufwand und z. B. einem komplizierten Gussteil mit geringerem Bearbeitungsaufwand einschließlich des dann oft größeren Terminrisikos entscheiden zu müssen. Die Beurteilung der Einfachheit muss also immer in einer *ganzheitlichen Betrachtung* vorgenommen werden. Was im Einzelfall als einfacher angesehen werden kann, hängt von der Aufgabenstellung und ihren Bedingungen ab.

Anhand der Leitlinie sollen wieder die Zusammenhänge umfassend betrachtet werden:

**Funktion** Grundsätzlich wird man schon bei der Diskussion der Funktionsstruktur nur

- eine möglichst geringe Anzahl sowie
- eine übersichtliche und folgerichtige Verknüpfung

von Teilstrukturen weiterverfolgen.

**Wirkprinzip** Auch bei der Auswahl des Wirkprinzips wird man nur solche mit

- einer geringen Anzahl von Vorgängen und Komponenten,
- durchschaubaren Gesetzmäßigkeiten und
- wenig Aufwand

berücksichtigen.

**Auslegung** Beim Vorgang der Auslegung weist die Regel „einfach“ darauf hin,

- geometrische Formen zugrunde zu legen, die direkt für die mathematischen Ansätze in der Festigkeits- und Elastizitätslehre tauglich sind,

- mit der Wahl symmetrischer Formen übersichtlichere Verformungen bei der Fertigung, unter Last und unter Temperatur zu erzwingen.

Bei vielen Objekten kann der Konstrukteur also sehr entscheidend Rechenarbeit und experimentellen Aufwand mindern, wenn er sich bemüht, mit einfacher Gestaltung die Vorbedingungen für einen leicht gangbaren Rechenansatz zu ermöglichen.

**Sicherheit** Siehe Grundregel „sicher“ in Abschn. 11.3.

**Ergonomie** Die Mensch-Maschine-Beziehung soll ebenfalls einfach sein und kann mit

- sinnfälligen Bedienvorgängen,
- übersichtlichen Anordnungen und
- leicht verständlichen Signalen

entscheidend verbessert werden.

**Fertigung und Kontrolle** Fertigung und Kontrolle können einfacher, d. h. rascher und genauer vorgenommen werden, wenn

- geometrische Formen gängige, wenig zeitraubende Bearbeitungen ermöglichen,
- wenige Fertigungsverfahren mit geringen Umspann-, Rüst- und Wartezeiten möglich sind,
- übersichtliche Formen die Kontrolle erleichtern und beschleunigen.

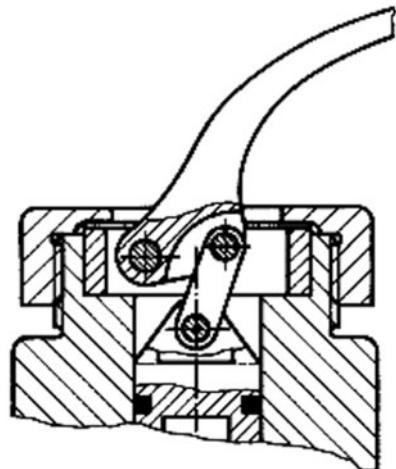
Abbildung 11.6 zeigt ein gutes Beispiel für ein nach der Grundregel „einfach“ gestaltetes Massenprodukt. Es handelt sich dabei um eine einfache Minikreissäge. Das Sägeblatt mit 60 mm Durchmesser ist in der Abbildung durch eine Papierscheibe ersetzt. Eine Gehäusehälfte der Säge wurde entfernt.

Nach der Grundregel „einfach“ ist hier insbesondere der Tiefenanschlag der Säge gestaltet. Die Außenansicht der Säge, unten rechts im Bild, lässt den Verstellmechanismus erkennen. Seine Bauteile sind unten auf der linken Seite wiedergegeben. Die Einstellspindel mit dem Betätigungsrad und der Staubdichtung ist oben links zu sehen. Der Anschlagsbolzen, welcher die Schutzkappe in deren Inneren in ihrer senkrechten Bewegung begrenzt, ist sehr einfach und symmetrisch gestaltet. Die Rückstellkraft für den Anschlagsbolzen wird durch eine einfache Schraubenfeder erzeugt. Sie ist direkt in den beiden Gehäusehälften der Säge gelagert. Die Tiefeneinstellung des Anschlagsbolzens erfolgt über die Einstellspindel. Sie bewegt sich über eine genormte Sechskantmutter, die ebenfalls direkt in das Gehäuse eingelegt ist. Ein einfacher O-Ring sorgt für eine Abdichtung gegen Staub. Er liegt in der Nut des Gehäuses, zu erkennen im oberen Bild der Abb. 11.6, und liegt im montierten Zustand dann zwischen der Gehäuseaußenseite und der Innenseite des Betätigungsrades.

**Abb. 11.6** Nach der Grundregel „einfach“ gestaltetes Massenprodukt



**Abb. 11.7** Vorschlag für eine Hebelanordnung für eine Eingriff-Mischbatterie mit translatorischer und rotatorischer Einstellbewegung

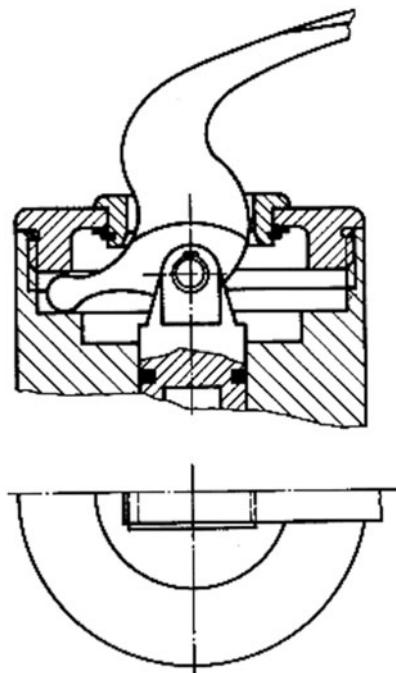


Ein weiterer Fall ergibt sich bei der Eingriff-Mischbatterie. Der in Abb. 11.7 dargestellte Entwurf einer Hebelanordnung befriedigte aus Gründen des Fertigungsaufwands, der Formgestaltung und Sauberhaltung (Schlitze, offene Kanäle) nicht. Für größere Stückzahlen kann eine einfacheren Lösung entwickelt werden, s. Abb. 11.8. Die anders ausgebildete Hebelform mit einem in Umfangs- und Radialrichtung „gleitenden“ Gelenk spart Teile und erhält Verschleißstellen, die einfach nachstellbar sind. Man erhält eine insgesamt wirtschaftlichere sowie auch für den Gebrauch (Sauberhaltung) und in der Formgebung ansprechendere Lösung.

**Montage und Transport** Die Montage wird ebenfalls vereinfacht, d. h. erleichtert, beschleunigt und zuverlässiger ausgeführt, wenn

- die zu montierenden Teile leicht erkennbar sind,
- eine schnell durchschaubare Montage möglich ist,

**Abb. 11.8** Einfachere und zugleich formgestalterisch verbesserte Lösung des Vorschlags. (Nach Abb. 11.7) (ähnlich Bauart Schulte)



- jeder Einstellvorgang nur einmal nötig ist und
- eine Wiedermontage bereits montierter Teile vermieden wird.

**Gebrauch und Instandhaltung** Hinsichtlich Gebrauch und Instandhaltung bedeutet die Regel „einfach“:

- Der Gebrauch soll ohne besondere, komplizierte Einweisung möglich sein.
- Übersichtlichkeit der Vorgänge und leichte Erkennbarkeit von Abweichungen oder von Störungen sind erwünscht.
- Wartungsvorgänge unterbleiben, wenn sie umständlich, unbequem und zeitraubend vorgenommen werden müssen.

**Recycling** Ein „einfaches“ Recycling wird durch

- Verwendung verwertungsverträglicher Werkstoffe,
- durch einfache Montage- und Demontagevorgänge und
- durch Einfachheit der Teile selbst erreicht.

## 11.3 Sicher (Alfred Neudörfer)

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter *sicher* das zuverlässige Erfüllen technischer Funktionen, d. h. die Fähigkeit eines technischen Systems, innerhalb vorgegebener Grenzen und während einer bestimmten Dauer die vom Verwendungszweck gestellten Anforderungen zu erfüllen (funktionale Zuverlässigkeit), verstanden. Im eigentlichen Sinne ist aber unter *sicher* vor allem frei sein von Gefahren für Mensch und Umwelt gemeint. Der Begriff Sicherheit (*safety*) als Schutz der Menschen beim Umgang mit technischen Systemen ist abzugrenzen vom Begriff *security*, als Schutz von Personen gegenüber zielgerichteten böswilligen Angriffen anderer.

Sicher ist eine der Grundregeln für methodisches Konstruieren erfolgreicher Produkte. Sicherheitsgerechtes Konstruieren tangiert moralische/ethische Ebenen und wirkt sich auf die Rechtssicherheit der Mitarbeiter in Entwicklung und Konstruktion aus. In der EG-Maschinenrichtlinie ([2006/42/EG](#)) sind für die wesentlichen Grundbegriffe der Sicherheitstechnik folgende Definitionen aufgeführt:

- Sicherheit** ist eine Sachlage, bei der das Risiko kleiner als das Grenzrisiko ist.
- Grenzrisiko** ist das größte noch vertretbare anlagenspezifische Risiko eines bestimmten technischen Vorgangs oder Zustands.
- Risiko** wird durch Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) und durch den zu erwartenden Schadensumfang (Tragweite) beschrieben.
- Schutz** ist die Verringerung des Risikos durch geeignete Vorkehrungen, die entweder die Eintrittshäufigkeit oder den Umfang des Schadens oder beides verringern.

### 11.3.1 Rechtliche Grundlagen des sicherheitsgerechten Konstruierens

Im Unterschied zu allen anderen Gestaltungsbereichen unterliegt das an sich kreative Konstruieren sicherheitsgerechter Maschinen mehreren gesetzlichen Vorgaben, die schon aufgrund eigener Rechtssicherheit tunlichst zu respektieren sind.

Seit 1993 gelten in Europa verbindliche Rechtsgrundlagen für die Beschaffenheit und Verwendung von Maschinen und anderen technischen Einrichtungen, wie z. B. von elektrischen Betriebsmitteln, einfachen Druckbehältern usw. Das Herstellen, Importieren, Ausstellen auf Messen, Inverkehrbringen, Inbetriebnehmen und Benutzen von Maschinen unterliegt Vorschriften, die im gesamten europäischen Wirtschaftsraum gelten. Alle, die Maschinen bauen oder umbauen, importieren/exportieren, verkaufen und betreiben, sind an diese neuen Sicherheitsbestimmungen gebunden. Halten sie sie nicht ein, handeln sie rechtswidrig.

Ein wesentliches politisches Ziel der Europäischen Gemeinschaft ist es, einen freien und ungehinderten Handel im europäischen Binnenmarkt zu ermöglichen. Als besonders einengende Handelshemmnisse erwiesen sich in der Vergangenheit nationale technische

Sicherheitsbestimmungen, die für gleiche Maschinen in den jeweiligen Staaten unterschiedlich waren. Das führte dazu, dass Hersteller ihre Maschinen unterschiedlich konfigurieren mussten, um sie auf den jeweiligen nationalen Märkten anbieten zu dürfen. Das europäische Rechts-Konzept basiert auf dem Erlass von Binnenmarktrichtlinien mit grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen, die durch harmonisierte Europäische Normen technisch konkretisiert werden. Charakteristisch für dieses Rechtssystem ist eine ausgeprägte Teilung der Kompetenzen:

1. Die von der Europäischen Gemeinschaft erlassenen Richtlinien enthalten zwar verbindliche technische Sicherheitsanforderungen, allerdings nur als Zielvorgaben in einer allgemein beschreibenden Art. Hersteller müssen sie zwingend einhalten. Mit welchen Maßnahmen sie diese Anforderungen einhalten, bleibt letztendlich ihnen überlassen.
2. Die nichtstaatlichen Organisationen CEN (Comité Européen de Normalisation) und CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) sind von der Europäischen Gemeinschaft beauftragt (mandantiert), eine europäisch harmonisierte Normung zu verwirklichen, um die Anforderungen der bewusst allgemein gehaltenen Richtlinien zu konkretisieren und den Stand der (Sicherheits-)Technik zu bestimmen.

Alle Staaten des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) sind verpflichtet, sowohl Richtlinien (mehr als 20) als auch harmonisierte Normen unverändert national umzusetzen und ihnen rechtliche Gültigkeit zu verschaffen. In Deutschland geschieht das durch das Produktsicherheitsgesetz (Klindt 2004; ProdSG 2011) und seine 9. ProdSV (Maschinenverordnung).

Die EG-Niederspannungs-Richtlinie ([2006/95/EG](#)) gilt für elektrische Betriebsmittel, wie Elektrogeräte (Haushaltgeräte, Bürogeräte), Elektrobauteile zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen (Elektromotoren, Schaltgeräte) usw. Sie gilt auch für Maschinen mit überwiegend elektrischen Gefahren (z. B. Transformatoren, Funkenerosionsmaschinen).

Für Maschinen mit elektrischer/elektronischer Ausrüstung, und das werden wohl die meisten sein, sind die Vorgaben der Richtlinie über elektromagnetische Felder ([2004/40/EG](#)) zu beachten. Hersteller müssen dafür sorgen, dass Maschinen ausreichend unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen sind und dass die von den Maschinen ausgehenden elektromagnetischen Felder innerhalb zulässiger Grenzen bleiben.

**EG-Maschinenrichtlinie ([2006/42/EG](#))** Eine der wichtigsten Binnenmarkt-Richtlinien ist die EG-Maschinenrichtlinie. Sie regelt, unter welchen Voraussetzungen Maschinen im Europäischen Wirtschaftsraum legal erstmals in den Verkehr gebracht und in den Betrieb genommen werden dürfen. Sie legt im Anhang I verbindliche „Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Konstruktion und Bau von Maschinen“ fest.

Im Anhang I der Maschinenrichtlinie sind nicht nur verbindliche Anforderungen an die Sicherheit von Maschinen festgelegt. Er enthält auch die Methodik des Konstruierens sicherer Maschinen: Der Hersteller einer Maschine hat dafür zu sorgen, dass während

des Konstruktionsprozesses Risikobeurteilungen vorgenommen werden, um die für die Maschinen geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen zu ermitteln. Das iterative Vorgehen besteht aus folgenden Schritten:

- Bestimmung der Grenzen der Maschine (einschließlich ihrer bestimmungsgemäßen Verwendung und vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung),
- Ermitteln der von der Maschinen ausgehenden Gefährdungen und der mit ihnen verbundenen Gefährdungssituationen,
- Abschätzen von Risiken unter Berücksichtigung der Schwere möglicher Verletzungen/Gesundheitsschäden und der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens,
- Bewerten und Beurteilen dieser Risiken, um zu entscheiden, welche Maßnahmen zur Risikominderung notwendig sind und
- Ausschalten von Gefährdungen oder Mindern der Risiken durch Schutzmaßnahmen.

Für das eigentliche Konstruieren ist ebenfalls eine verbindliche Reihenfolge festgelegt:

1. Konzept der innenwohnenden, inhärenten Sicherheit: Beim Konstruieren werden Gefährdungspotenziale vermieden oder derart reduziert, dass selbst bei deren vollständiger Freisetzung keine Gefährdung für Mensch und Umwelt entstehen kann (unmittelbare Sicherheitstechnik).
2. Konzept der zusätzlichen, integrierten Sicherheit: Durch Integration passiver oder aktiver Sicherheitsmaßnahmen beim Konstruieren wird die Eintrittswahrscheinlichkeit unerwünschter Ereignisse soweit reduziert, dass Gefahrenpotenziale ausreichend zuverlässig beherrscht werden (mittelbare Sicherheitstechnik).
3. Konzept der Verhaltensbedingten Sicherheit: Durch informationstechnische und organisatorische Maßnahmen werden die Nutzer zum sicherheitsgerechten Verhalten angehalten, damit sich Restrisiken nicht realisieren können (hinweisende Sicherheitstechnik).

Die Maschinenrichtlinie schreibt verbindlich vor, dass eine Maschine nur auf den Markt gebracht werden darf, wenn der Hersteller

- eine Konformitätserklärung ausstellt, in der er die Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen der Richtlinie bescheinigt,
- die CE-Kennzeichnung dauerhaft und gut sichtbar anbringt,
- eine Betriebsanleitung in der Sprache des Anwenderlandes mit ausliefert und
- eine ausführliche Dokumentation aller an der Maschine getroffenen Sicherheitsmaßnahmen 10 Jahre intern so aufbewahrt, dass ein Zugriff nach Aufforderung durch Behörden nicht länger als zwei Wochen dauert.

Nach der konstruktiven Umsetzung der Sicherheitsmaßnahmen ist es sehr empfehlenswert, ihr Vorhandensein und ihre Wirksamkeit an der fertiggestellten Maschine zu überprüfen und das Ergebnis eindeutig, z. B. mit Fotos oder Videoaufnahmen zu dokumentieren.

*Nichtverwendungsfertige Baugruppen* oder (Teil-)Maschinen dürfen keine CE-Kennzeichnung tragen. Für sie muss eine Einbauerklärung ausgestellt werden, die zwar praktisch den gleichen Inhalt wie die Konformitätserklärung hat, aber um einen wichtigen Passus erweitert ist: Der Hersteller muss die Verwendung der (Teil-)Maschine so lange verbieten, bis die Gesamtmaschine, in die sie eingebaut wird, allen Sicherheitsvorschriften entspricht. Er muss auch eine Montageanleitung mitliefern.

Um Missverständnissen vorzubeugen: Es genügt nicht, an Maschinen die zwei Buchstaben CE anzubringen und die Sache auf sich beruhen zu lassen. Die CE-Kennzeichnung ist vielmehr das letzte Glied in der Kette vorgeschriebener Maßnahmen:

- Vor dem eigentlichen Konstruieren alle Gefahren analysieren, die bei der Nutzung der Maschinen in allen ihren Lebensphasen vorkommen können, und
- danach die mit den Gefahren verbundenen Risiken, denen sich Benutzer der Maschinen in allen ihren Lebensphasen aussetzen werden, abschätzen und beurteilen und
- aufgrund dieser Erkenntnisse Maschinen so konstruieren und bauen, dass die Restrisiken unterhalb des von der Gesellschaft tolerierten Niveaus bleiben (Hüning et al. 2006).

All dies setzt umgesetzte organisatorische Maßnahmen und einschlägig kompetentes und qualifiziertes Personal in den Konstruktionsabteilungen voraus (Neudörfer 2013; Preuße 2008).

**Normen und ihre Bedeutung für das sicherheitsgerechte Konstruieren** Nationale Normungsorganisationen, z. B. das Deutsche Institut für Normung e. V. (DIN), sind Foren, in denen Werknormen der Hersteller und technische Anforderungen privater oder öffentlicher Anwender koordiniert werden. CEN und CENELEC haben eine andere Ausrichtung: Sie sollen durch Europäischen Normen (erkennbar am Kürzel EN, das hinter der Landeskennung steht, z. B. DIN EN in Deutschland) die im Anhang I der Maschinenrichtlinie verbalisierten Sicherheitsanforderungen als aktuellen Stand der (Sicherheits-)Technik festlegen, technisch konkretisieren und somit sicherstellen, dass aufgrund der normkonformen sicherheitstechnischen Ausrüstung einer Maschine für sie keine Hindernisse im innereuropäischen Handel entstehen. Das Europäische Normenwerk ist in drei Ebenen gegliedert.

1. Sicherheitsgrundnormen (Typ A-Normen): Sie regeln grundlegende sicherheitstechnische Festlegungen und Begriffe, die alle Maschinen betreffen.
2. Sicherheitsfachgrundnormen (Typ B1- und B2-Normen): Typ B1-Normen behandeln allgemeine Sicherheitsaspekte, die für mehrere Arten von Maschinen relevant sind, z. B. Sicherheitsabstände zu Gefahrstellen. Typ B2-Normen befassen sich mit Sicherheitseinrichtungen, z. B. mit der Ausführung von Zweihandschaltungen. Sie richten sich an Hersteller von Sicherheitskomponenten und Maschinen.

3. Maschinensicherheitsnormen (Typ C-Normen): Sie treffen detaillierte Festlegungen und beschreiben Schutzmaßnahmen zu spezifischen Gefährdungen einer Maschinenart oder Maschinengruppe.

Von besonderer Bedeutung sind *harmonisierte Europäische Normen*. Eine Europäische Norm gilt als harmonisiert, wenn sie nach festgelegten und verbindlichen Regularien unter einem Mandat, sprich im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet, ratifiziert und im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft offiziell als Quelle (Titel), nicht als Volltext, veröffentlicht wurde. Im Vorwort der Norm muss die Harmonisierung bestätigt sein. Eine weitere Bedingung ist ihre Umsetzung in mindestens einem Mitgliedstaat.

Obwohl harmonisierte Normen weder Gesetze noch formell juristisch bindende Vorschriften sind, haben sie für Maschinenhersteller eine besondere Bedeutung. Bauen sie ihre Maschinen strikt nach harmonisierten EN-Normen, können sie vorerst davon ausgehen, dass die in den Normen von zahlreichen Experten festgelegten Maßnahmen die Anforderungen der relevanten Richtlinien, z. B. die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen des Anhangs I der Maschinenrichtlinie, erfüllen und somit Kontrollorgane, z. B. Zollbehörden an den Grenzen und Marktaufsichtsbehörden innerhalb des EWR, vorerst davon ausgehen werden, dass die grundlegenden Anforderungen aller relevanten Richtlinien eingehalten sind (=Vermutungswirkung). Mit anderen Worten, diese Behörden müssen im Falle einer sicherheitsbezogenen Beanstandung erst nachweisen, dass ein konkreter Hersteller einen bestimmten Fehler gemacht hat.

Hersteller können ihre Maschinen nach harmonisierten Normen bauen, müssen es aber nicht: Da Normung durch ihren bewahrenden Charakter neue Entwicklungen (die natürlich wünschenswert sind) nicht immer fördert, ist es Herstellern erlaubt, Maschinen abweichend von harmonisierten Normen zu bauen. Die Beweislast kehrt sich um: Hersteller müssen nachweisen, dass sie mit ihren innovativen Lösungen die gleiche Sicherheit erreicht haben, wie sie in den Richtlinien gefordert ist.

Bewegen sich Hersteller bzw. die Verantwortlichen in den Konstruktionsabteilungen beim Anwenden des Standes der Technik auf der Basis eines fundierten Wissens, das durch langjährige Erfahrungen gestützt wird, schaffen Rechtssätze wie harmonisierte Normen eine hohe Rechtssicherheit, auch in Haftungsfragen. Aber keine absolute!

Zivilrechtlich und/oder strafrechtlich unangreifbar werden die Produkte dadurch aber nicht! Hersteller sollten sich im Sinne der Produkthaftung beim Entwickeln und Konstruieren ihrer Produkte nicht nur an den Stand der Technik halten. Sie sollten sich mit aller Sorgfalt zeitbezogen an den neuesten allgemein zugänglichen technischen und wissenschaftlichen Erkenntnissen orientieren und alle nach dem gesicherten Stand von Wissenschaft und Technik möglichen Sicherheitsvorkehrungen treffen. Der verfügbare Stand von Wissenschaft und Technik ist nämlich der Maßstab beim Zumessen der rechtlichen Verantwortung im Falle eines schweren Unfalls technischer Ursache (Krey und Kapoor 2009).

*IEC- und ISO-Normen* gelten nicht nur in Europa, sondern weltweit. Mittlerweile sind Inhalte zahlreicher Europäischer Normen, die Lösungen für die Konstruktion sicherheitsgerechter Maschinen beschreiben, von der internationalen Normung aufgegriffen und in

ISO- bzw. IEC-Normen umgesetzt worden (EN ISO- bzw. EN IEC-Normen). Sofern ISO-Normen den materiellen Inhalt Europäischer Normen vollständig übernommen haben, sind sie von gleicher rechtlicher Bedeutung wie die originären Europäischen Normen. Sie lösen also auch die Vermutungswirkung aus, dass die nach diesen Normen gebauten Maschinen ebenfalls die EG-Maschinenrichtlinie erfüllen. Das hat für weltweit agierende Maschinenhersteller den Vorteil, dass sie sich auf längere Zeit betrachtet auf weltweit gleiche Sicherheitsstandards einstellen können.

### 11.3.2 Mit Maschinen verbundene Gefahren und Risiken

Hersteller sind verpflichtet, alle mit ihren Maschinen verbundenen Gefahren zu ermitteln, die sich aus ihnen ergebenden Gefährdungen zu analysieren und die mit ihnen verbundenen Risiken zu beurteilen. Die dann zu ergreifenden Sicherheitsmaßnahmen richten sich jeweils nach den ermittelten Gefährdungen und den sie begleitenden Risiken. Die Begriffe Gefahr, Gefährdung und Risiko entstammen der Allgemeinsprache, haben aber in der Sicherheitstechnik eine enge Bedeutung.

Als *Gefahr* wird im allgemeinen Sprachgebrauch die Möglichkeit bezeichnet, dass ein Schaden oder ein Unfall eintritt. Gefahr ist also zumeist etwas Physisches, Greifbares, etwas, was Naturgesetzen unterliegt. Im Sinne der Sicherheitstechnik ist Gefahr ein objektiv vorhandenes energetisches oder stoffliches Potenzial (latent oder virulent, abhängig von der momentanen Wirkung), das von sich aus zu unterschiedlich schweren Beeinträchtigungen, gesundheitlichen Schäden oder Unfällen führen kann.

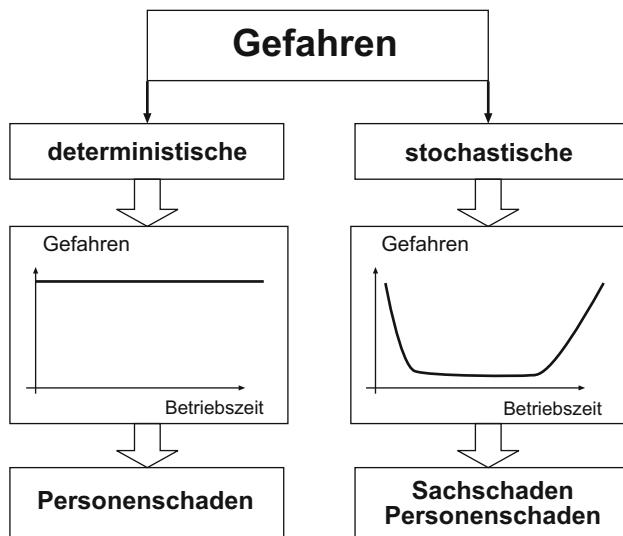
Eine *Gefährdung* tritt ein, sobald es möglich ist, dass Menschen mit Gefahren zeitlich und räumlich zusammentreffen und sie sich diesen konkreten Gefahren aussetzen. Erst dieses Zusammentreffen ist die notwendige Bedingung, damit Beeinträchtigungen, gesundheitliche Schäden oder Unfälle eintreten. Gefährdungen haben also eher den Charakter einer handlungsbezogenen Situation.

*Risiko* ist die aus diesem Sachverhalt hergeleitete Wahrscheinlichkeitsaussage zu den mit unterschiedlicher Häufigkeit auftretenden Auswirkungen von Gefahren auf Mensch bzw. Umwelt (sprich Gefährdungen) und zu der möglichen Schwere der Auswirkungen und deren Folgen. Risiko ist also eine kalkulierte Prognose dieses unerwünschten Ereignisses.

Die Schwere der Folgen ist der dominierende Aspekt der Risikobeurteilung. Die Eintrittwahrscheinlichkeit hängt von der Art der Gefahren (deterministisch, stochastisch, s. u.) und der prozessbedingten Eingriffshäufigkeit der Personen, d. h. von der Häufigkeit der Gefährdungen, ab. Die Höhe des Risikos einer gesundheitlichen Gefährdung oder eines Körperschadens ergibt sich zudem noch durch die Möglichkeit oder Unmöglichkeit technischer, organisatorischer oder personenbezogener Schutzmaßnahmen.

Für die Konstrukteure ist es wichtig zu wissen, dass Ursachen von Gefahren in den Wirkgrößen Stoff, Energie und Signal liegen, also in Größen, mit denen sie im Konstruktionsprozess operieren und sie daher sichere Zustände mit den gleichen Methoden, mit denen sie funktionstüchtige technische Systeme gestalten, erreichen können.

**Abb. 11.9** Deterministische und stochastische Gefahren



Stoffe können wegen ihrer chemischen oder biologischen Eigenschaften dem Menschen gefährlich werden. Aber auch aufgrund der Eigenschaft als raumfüllende Materie im Schwerfeld der Erde kann die Grundgröße Stoff Menschen beeinträchtigen. Das ist immer der Fall, wenn das geometrische Layout der Maschine zu erzwungenen Körperhaltungen führt oder schwere Lasten getragen oder transportiert werden müssen.

Jede Maschine braucht für ihre technologische Funktion Energien. Und alle Energien, die zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe benutzt werden, können Menschen gefährden, sobald sie sich unkontrolliert auf ihn auswirken können und dabei bestimmte Energiedichten überschreiten.

Aber auch ein ungünstig gestalteter Signalfluss zwischen Mensch und Maschine sowie seine Randbedingungen können bei Menschen ein Verhalten hervorrufen, das sie gefährdet. Die Grundgröße Signal impliziert aber im Zusammenhang mit Menschen, dass die Sicherheit in Arbeitssystemen auch von den Gesetzmäßigkeiten der Informationsverarbeitung durch Menschen, sprich vom Verhalten Betroffener, abhängen wird.

Aus der Sicht des sicherheitsgerechten Konstruierens gibt es hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zwei Arten von Gefährdungen: stochastische (zufallsbedingte) und deterministische (vorbestimmte), s. Abb. 11.9.

*Stochastische Gefährdungen* treten während der Lebensdauer einer Maschine mit einer zeitabhängigen Wahrscheinlichkeit auf (am häufigsten visualisiert mit der Badewannenkurve, obwohl diese genau genommen nur für wenige Baugruppen oder Bauteile gilt (Börcsök 2008)), dann aber plötzlich und überraschend. Diese Gefährdungen bzw. deren Ursachen lassen sich nur selten unmittelbar erkennen und, wie spektakuläre Unfälle immer wieder belegen, nicht immer voraussagen.

*Deterministische Gefährdungen* sind im funktionellen Aufbau der Maschine begründet, z. B. durch technologisch notwendige Gefahrstellen an Werkzeugen mit ihren Sollbewegungen. Diese Gefährdungen sind latent während der ganzen Lebensdauer der Maschine mit einer gleichbleibend hohen Wahrscheinlichkeit vorhanden. Ein Unfall an derartigen Gefahrstellen ist deshalb nur eine Frage der Zeit, sofern ihnen nicht konstruktiv entgegengewirkt wird.

*Gefahrstellen* sind die wichtigsten deterministischen mechanischen Gefahren. Sie entstehen bei bestimmten Konfigurationen von Maschinenteilen, die sich aufgrund von außen zugeführter Antriebsenergie oder gespeicherter kinetischer Energie in festgelegten Bahnen bewegen und dabei Menschen gefährden können. Sie unterscheiden sich in der geometrischen Form ihrer Bauteile, in ihrer Wirkrichtung zum Körper und in ihrem Verletzungsmechanismus, s. Abb. 11.10. Im Unterschied zu stochastischen Gefahren sind Gefahrstellen nach einiger Übung erkennbar, sowohl in Zeichnungen, CAD-Darstellungen als auch an fertigen Maschinen.

Deterministisch wirkende mechanische Gefahrstellen bilden immer noch den Schwerpunkt aller Maschinenunfälle, weil ihre zerstörerische Wirkung unterschätzt wird, sowohl von den an der Produktkonstruktion Beteiligten, als auch von den Betroffenen.

**Risikobeurteilung** Risiko ist die Wahrscheinlichkeitsaussage über Auswirkungen von Gefährdungen auf Mensch bzw. Umwelt in einer fest umrissenen Sachlage, hergeleitet aus der Kombination der Häufigkeit und des Schweregrades von möglichen Verletzungen, Gesundheits- oder Sachschädigungen sowie der Möglichkeit oder Unmöglichkeit technischer, organisatorischer oder personenbezogener Schutz- oder Abwehrmaßnahmen (Reudenbach 2012; Wratil et al. 2010).

Risikobeurteilung im Sinne der Maschinenrichtlinie ist ein systematisches und organisiertes Verfahren zur Ermittlung und Beurteilung des mit der Maschine verbundenen Risikos unter Nutzung aller verfügbaren Informationen. Zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts wird die retrospektive oder prospektive Häufigkeit des räumlichen und zeitlichen Zusammentreffens mit Gefährdungen herangezogen. Bei der Beurteilung des Schadensausmaßes wird immer von den schwerstmöglichen Verletzungen oder Gesundheitsschäden, die überhaupt eintreten können, ausgegangen.

Im allgemeinen Maschinenbau sind das Denken in Risiken und der Umgang mit ihnen beim Konstruieren und Bauen von Maschinen relativ neu, jedoch gesetzlich vorgeschrieben. Richtig angewendet, eröffnet die Dreierstufung Gefährdung – Risiko – Schutzmaßnahmen neue, über normative Festlegungen hinausgehende sicherheitstechnische Gestaltungsmaßnahmen und bietet dabei ausreichende Rechtsicherheit für Maschinenhersteller.

Das Ergebnis der Risikobewertung und alle zur sicherheitstechnischen und ergonomischen Beurteilung der Maschine relevanten Unterlagen der Dokumentation müssen im Falle einer Beanstandung und Anforderung durch eine europäische Überwachungsbehörde innerhalb einer angemessenen Frist (in der Regel innerhalb von zwei Wochen) der Behörde dazu zur Verfügung gestellt werden – allerdings nur aus gegebenem Anlass.

Gefahrstellen								
Wirkung	Wirkrichtung	Wirkfläche	Grundtypen	Beispiele	Gefährdung durch	Gefährdungsparameter	typische Verletzungen	
1	2	3	Nr	5	6	7	8	9
Verformen	quer zum Körper	ebene Fläche	Punkt ●	1 Stoßstellen 	Maschinen Schlitten, umlaufende Handkurbeln	stumpfe Teile, die sich senkrecht zum Körper bewegen und ihn stoßen oder schlagen können	Geschwindigkeit der Wirkbewegung, Stoßweg, Einwirkzeit, Form- und Größe der Wirkfläche, Größe der Kraft	Prellungen, Quetschungen, Quetschwunden, geschlossene Wunden, innere Verletzungen, Knochenbrüche
			1 ebene Fläche □	2 Quetschstellen 	Preßwerkzeuge, Kipphebel, Abkant-, Verform- und Tiefziehwerkzeuge, Teile von Spritzgießformen, Preßbalken	Teile die sich gegeneinander oder gegen feste Teile so bewegen, dass ihr kleinst Abstand geringer ist als der Platzbedarf des Körpers oder seiner Teile	Geschwindigkeit der Wirkbewegung, Endabstand, Einwirkzeit, Form, Größe und Struktur der Kontaktfläche, Größe der Kraft	Prellungen, Quetschungen, Platzwunden, geschlossene Wunden, Zerreißungen, Knochenbrüche
			3 Linie - -	3 Scherstellen 	Sanzwerkzeuge, Speichenräder, Scheren, Hebelmechanismen, Scheren	Teile die sich so eng gegeneinander oder an anderen Teilen vorbeibewegen, dass Körperteile zwischen Kanten der Teile fixiert und gesichert werden	Geschwindigkeit der Wirkbewegung, Scherweg, Einwirkzeit, Form- und Größe der Wirkfläche, Größe der Kraft, Scherwinkel	Quetschungen, Amputationen
			4 Punkt ●	4 Schneidstellen 	scharfe Kanten, Schneidwerkzeuge, Sägen, Bandmesser, Messerwalzen, Kreismesser, Papierbahnen	Teile, deren Geometrie es erlaubt, Körperteile entlang einer Linie zu trennen oder Körperoberfläche z.B. durch Schaben zerstören können	Geschwindigkeit der Relativbewegung, Schneidweg, Einwirkzeit, Winkel, Rundung und Länge der Schneide	Hiebwunden, Schnittwunden, Amputationen
			5 Punkt ●	5 Stichstellen 	Nadeln, Heftklammern	feststehende oder bewegte spitze Gegenstände, die die Haut durchstoßen und in den Körper eindringen können	Geschwindigkeit der Relativbewegung, Stichweg, Einwirkzeit, Winkel, Rundung und Länge der Spitze	Stichwunden, penetrierende Wunden
	längs zum Körper	gekrümmte Fläche ○	6	6 Reibstellen 	raue Oberflächen, Schleifwerkzeuge	feststehende oder bewegte Teile, deren Oberfläche sich für den Körper wie Schneiden mit undefinierter Schneidengeometrie auswirken	Geschwindigkeit der Relativbewegung, Größe der Normalkraft, Oberflächengeschwindigkeit, Reibungsbeiwert, Mikrogeometrie der Schleifkörper	Hautabschürfungen, Schürfwunden, Risswunden, Ablederungen, Verbrennungen
			7	7 Fangstellen 	Wellenenden, glatte Wellen, Wellen mit Paßfedern, Keilen, Stellschrauben, Kupplungen, rotierende Werkzeuge, Hand- und Stellräder	rotierende Teile, die reibschlüssig (Seilreibung) oder formschlüssig Haare, Kleidungsstücke oder Körperteile mitreißen können	Drehzahl, Umfangsgeschwindigkeit, Drehradius, Reibungsbeiwert, Oberflächengeschwindigkeit und -zustand (trocken, nass, verölt), Breite der Wirkfläche, Vorsprünge	Skalpiersungen, Ablederungen, innere Verletzungen, Knochenbrüche, Ausreißen von Körperteilen
			8	8 Einzugstellen 	Reibgetriebe, Zahnraddrive, Zerkleinierungswalzen, Ausrollwalzen, Farb- und Feuchtwalzen, Druckzylinder, Kalander	Teile, die sich so gegen feste Teile bewegen, dass ein Einzugsplatz entsteht, in dem Körperteile zuerst erfasst und dann gequetscht werden	Walzenradien, Reibungsbeiwert, Oberflächengeschwindigkeit und -zustand (trocken, nass, verölt), Abstand der Oberflächen, Spaltbreite, Öffnungswinkel	Ablederungen, Quetschungen, Zerreißungen, Knochenbrüche, Verbrennungen
			9	9 Auslaufstellen 	Riemtriebe, Kettentriebe, Transportbänder	Einzugspalt zwischen festen, rotierenden und flexiblen, auflaufenden Teilen, in dem Körperteile zuerst erfasst, dann gequetscht und mitgerissen werden	Walzenradius, Reibungsbeiwert, Oberflächenrauhigkeit und -profil (Nuten), Öffnungswinkel, Profil und Nachgiebigkeit des Hülleiles, Umschlingungswinkel	Quetschungen, Knochenbrüche, Amputationen, Abdrehen von Körperteilen
			10	10 Hochdruckflüssigkeitsstrahl 	undichte Flanschverbindungen, perforierte Schläuche, Düsen für die Hochdruckwasserbearbeitung	Flüssigkeitsstrahl, dessen Staudruck die Haut durchstoßen, Medien in den Körper injizieren und/oder das Gewebe zerstören kann	Strahldurchmesser, Streuung des Strahls, Staudruck, Dichte, Temperatur und chemische Zusammensetzung des Mediums	Pfählungen, Injektionen, penetrierende Wunden, Amputationen
Trennen	beliebige Richtung zum Körper	ebene Fläche □	Punkt ●					

Abb. 11.10 Grundtypen von Gefahrstellen

Anmerkung: Anwender/Kunden haben kein öffentlich begründetes Recht, von Maschinenherstellern Ergebnisse der Risikobewertung zu bekommen. Privatrechtliche Regelungen sind aber möglich.

Um das tatsächliche Risiko zu erfassen und die Wirksamkeit der Sicherheitsmaßnahmen objektiv zu beurteilen, ist folgendes Verfahren notwendig: Alle Gefährdungen, auch wenn sie an der zu beurteilenden Maschine durch Maßnahmen der Sicherheitstechnik schon gesichert sein sollten, sind aufzulisten und ihnen dann die getroffenen oder noch zu treffenden Maßnahmen zuzuordnen – auch wenn die Verantwortlichen meinen sollten, bereits gesicherte Gefährdungen bräuchten nicht mehr aufgelistet werden. Vorsicht: In diesem Fall würden nämlich nur die Restrisiken beurteilt sein.

Risikobewertungen müssen für alle Lebensphasen der Maschine durchgeführt werden, sowohl für Lebensphasen vor der eigentlichen Nutzungsphase (z. B. Transport, Aufbau, Probelauf) als auch nach ihr (z. B. Abbau und Demontage sowie Recycling).

Risikobewertungen sind jedoch, lebensnah betrachtet, iterative Prozesse, die je nach Stand des Entwicklungs-, Konstruktions- und Montageprozesses mehrmals durchlaufen, mit allen an der Entstehung der Maschine Beteiligten kommuniziert und vor allem sorgfältig dokumentiert werden müssen, s. Abb. 11.11.

**Praktisches Vorgehen bei der Risikobeurteilung vorab:** Es gibt kein allgemein verbindliches und universell einsetzbares Verfahren zur Risikobeurteilung (Eberhardt 2008; Schulz 2008). Dazu sind die Realitäten in den Bereichen der Technik zu komplex. In der Praxis werden zurzeit meistens drei Verfahrensarten angewendet, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen:

1. Multiplikative Verfahren
2. Risikographen
3. Risikomatrizen

Alle drei Verfahren setzen die Häufigkeit und Schwere der zu erwartenden Ereignisse in Beziehung. Risikographen und Risikomatrizen berücksichtigen noch die Möglichkeit oder Unmöglichkeit von Schutz- oder Abwehrmaßnahmen.

*Multiplikative Verfahren* definieren das Risiko als Produkt aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens. Je häufiger (wahrscheinlicher) ein bestimmter Schaden ist, desto geringer muss dessen Tragweite sein, damit ein bestimmtes Risiko nicht überschritten wird. Errechnete Werte lassen sich nicht ohne Weiteres vergleichen: Arithmetisch betrachtet, kann der berechnete Wert des Risikos eines großen, wenn nicht katastrophalen, aber sehr selten auftretenden Schadens gleich sein mit dem Zahlenwert eines Risikos kleiner, aber sehr häufig auftretender Schäden.

*Beispiel:* Die Eintrittswahrscheinlichkeit AW ist, s. Abb. 11.12, in fünf Stufen, die Schwere möglicher Verletzungen in vier Stufen klassifiziert. Das Produkt beider Zahlen führt zum

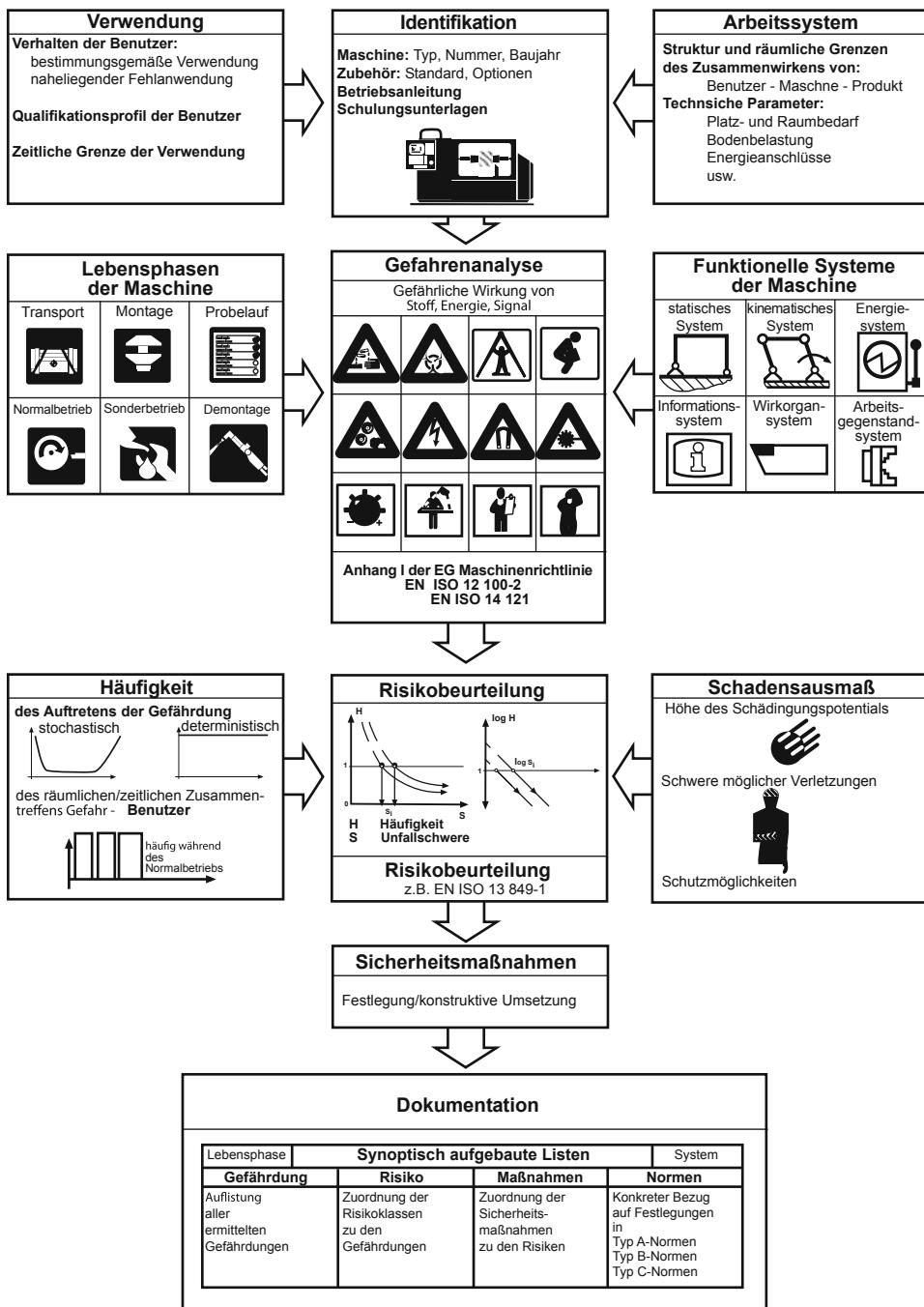
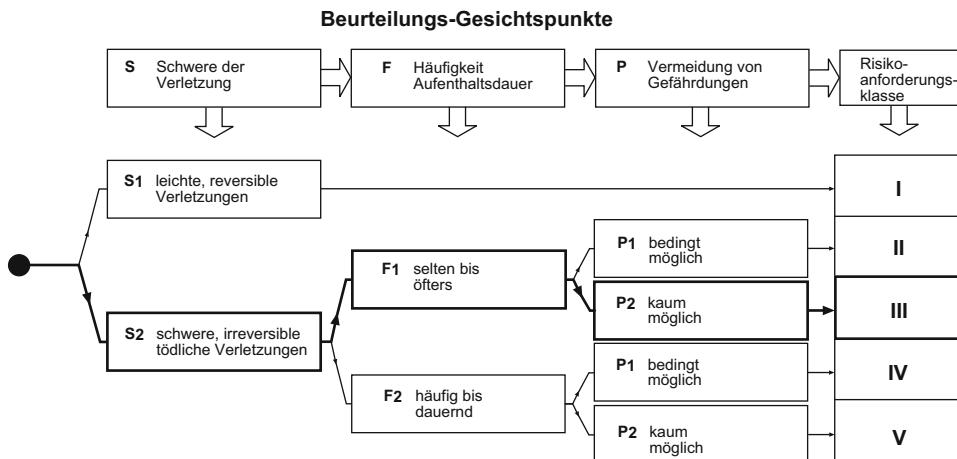


Abb. 11.11 Risikobewertung im Überblick

	Ereignis kommt häufig vor	5	5	10	15	20
	Ereignis kommt selten vor	4	4	8	12	16
	Ereignis ist vorstellbar	3	3	6	9	12
	Ereignis ist kaum vorstellbar	2	2	4	6	8
	Ereignis kommt nicht vor	1	1	2	3	4
Risikoprioritätszahl RPZ = AW x VS	Nr.	1	2	3	4	
		kleinere Verletzungen	reversible Verletzungen	irreversible Verletzungen	tödliche Verletzungen	
		<b>Schwere der Verletzung VS</b>				

**Abb. 11.12** Multiplikative Risikobewertung



**Abb. 11.13** Prinzipieller Aufbau von Risikographen

numerischen Wert der Risikoprioritätszahl. Ihre Wertigkeit basiert auf aktuellen gesellschaftlichen Wertvorstellungen. Die zu ergreifenden Sicherheitsmaßnahmen hängen vom vorher festgelegten Zahlenwert der Risikoprioritätszahl ab.

*Riskographen* ermöglichen es, konkrete Risiken aufgrund einiger weniger, das jeweilige Risiko kennzeichnender Parameter anhand eines Zuordnungs- und Klassifizierungsschemas mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes abzuschätzen, s. Abb. 11.13. Sinnvolles

Risikomatrix	zyklischer Eingriff	gelegentlicher Eingriff		Eingriff möglich, aber nicht zu erwarten	
irreversible Verletzung	<b>R1</b>	Abwehr unmöglich	<b>R1</b>	Abwehr unmöglich	<b>R1</b>
		Abwehr möglich	<b>R2</b>	Abwehr möglich	<b>R2</b>
reversible Verletzung		Abwehr unmöglich	<b>R2</b>	<b>R3</b>	
		Abwehr möglich	<b>R3</b>		
Bagatell-Verletzung		<b>R3</b>		<b>R4</b>	

**R1** hohes Risiko, **R2, R3** mittleres Risiko **R4** geringes Risiko

**Abb. 11.14** Prinzipieller Aufbau von Risikomatrizen

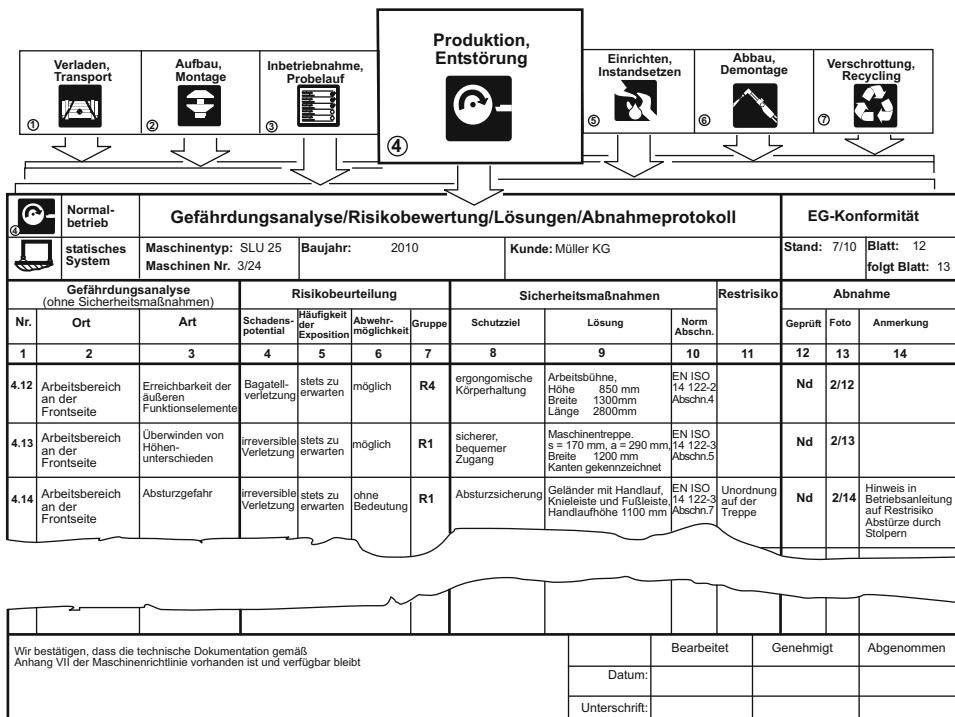
Kombinieren der Beurteilungsgesichtspunkte mit ihren Merkmalen führt zu mehreren Risikoklassen. Charakteristisch für Risikographen ist, dass die jeweilige Risikoklasse das Ergebnis einer einzigen Merkmalskombination ist. Eine für die Praxis brauchbare Grundlage zur Risikobewertung an Arbeitsmitteln regelt die Norm DIN EN ISO 12 100. Risikographen nach der Norm DIN EN ISO 13 849 beziehen sich zwar, genau genommen, nur auf Bauteilversagen innerhalb der Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen, sind aber im Sinne der EG-Maschinenrichtlinie ebenfalls für die meisten Fälle des allgemeinen Maschinenbaus geeignet.

*Riskomatrizen* kombinieren beide Verfahren, ermöglichen daher mehr Merkmalskombinationen. Somit sind auch mehr Risikogruppen denkbar, s. Abb. 11.14. Verfeinerte Betrachtungen erschweren jedoch erfahrungsgemäß die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens, ohne dass die Aussagen über Risiken zuverlässiger werden. Die Praxis zeigt, dass vier Risikogruppen, die allerdings auf mehreren Wegen erreicht werden können, ausreichend sind.

Das europäische technische Recht verlangt die ausreichende Dokumentierung aller Risiken, die von Maschinen ausgehen, sowie der jeweiligen Gegenmaßnahmen, die gewährleisten, dass Risiken unterhalb gesellschaftlich akzeptierter Grenzwerte (Restrisiken) bleiben. Risiken und grundlegende sicherheitstechnische Anforderungen und deren Erfüllung in allen Phasen des Lebenslaufes einer Maschine müssen nachvollziehbar dokumentiert sein. Weder Formblätter noch deren Aufbau bzw. Inhalt sind normativ festgelegt. Die Ausführung der Dokumentation liegt in der Verantwortung der Maschinenhersteller.

Für die eigene Rechtssicherheit der Hersteller kann es nur von Vorteil sein, wenn Dokumentationen einerseits von einem systematischen Ansatz ausgehen und andererseits in einer übersichtlichen Form (Gefährdung – Risiko – Schutzmaßnahmen) vorliegen, auf die ohne großen Aufwand schnell zurückgegriffen werden kann. Gliederung und Aufbau der Dokumentationen kann sich nach Gefahren, z. B. gemäß Anhang I der Maschinenrichtlinie, orientieren oder der technischen und technologischen Funktion der Maschine folgen.

Der Übersichtlichkeit halber sollten synoptische tabellarische Aufstellungen aller relevanten Gefährdungen, der mit ihnen verbundenen Risiken und Auflistungen sicher-



**Abb. 11.15** Ausführliche Dokumentation der Gefährdungsanalyse und der Risikobeurteilung

heitstechnischer Lösungen angestrebt werden, s. Abb. 11.15. Ausführliche Fotodokumentationen getroffener Sicherheitsmaßnahmen erleichtern die Beweisführung im Falle von Beanstandungen durch Behörden.

Des Weiteren sind Restrisiken zu dokumentieren, die trotz aller konstruktiver Maßnahmen verbleiben. Restrisiken sind:

- bewusst akzeptierte Risiken
  - nach Anwendung harmonisierter Normen
  - des täglichen Lebens
- erkannte, aber falsch beurteilte Risiken
- nicht erkannte Risiken

Restrisiken lassen sich nicht beseitigen, ohne den Nutzen des Produkts infrage zu stellen oder gar unmöglich zu machen. Es wird ein prinzipiell nicht zu eliminierender Teil des Restrisikos verbleiben.

Die Maschinenrichtlinie folgt der Lebenserfahrung, dass es kein menschliches Verhalten mit vollständiger Gewissheit gibt und dies auch für sicherheitstechnische Belange gilt. Deshalb müssen bei der Risikobeurteilung sicherheitswidrige Verhaltensweisen und ver-

nünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendungen durch die jeweiligen Nutzer im Rahmen der Produktkonstruktion berücksichtigt werden. Dies ist eine Aufgabe, die sich wahrscheinlich niemals vollständig lösen lassen wird. Denn sie ist widersprüchlich: Es ist zweckmäßig und wichtig, die Phantasie und den Tatendrang der Maschinenbenutzer nicht zu unterschätzen. Diese stehen oft unter Druck und verwenden zugleich reichlich Zeit zum Nachdenken, wie hinderliche Sicherheitsmaßnahmen umgangen werden können. Die Erfahrung aus verhaltensbedingten Unfällen zeigt aber – egal, ob die Ursache ein reflexives, unbewusstes oder bewusstes Handeln war –, dass dieses Verhalten selten aus freien Stücken geschieht, sondern sich meistens auf nicht optimale Maschinen- oder Bedienungskonzepte bzw. unzulängliche Produktinformationen zurückführen lässt.

### 11.3.3 Konstruktionsmaßnahmen

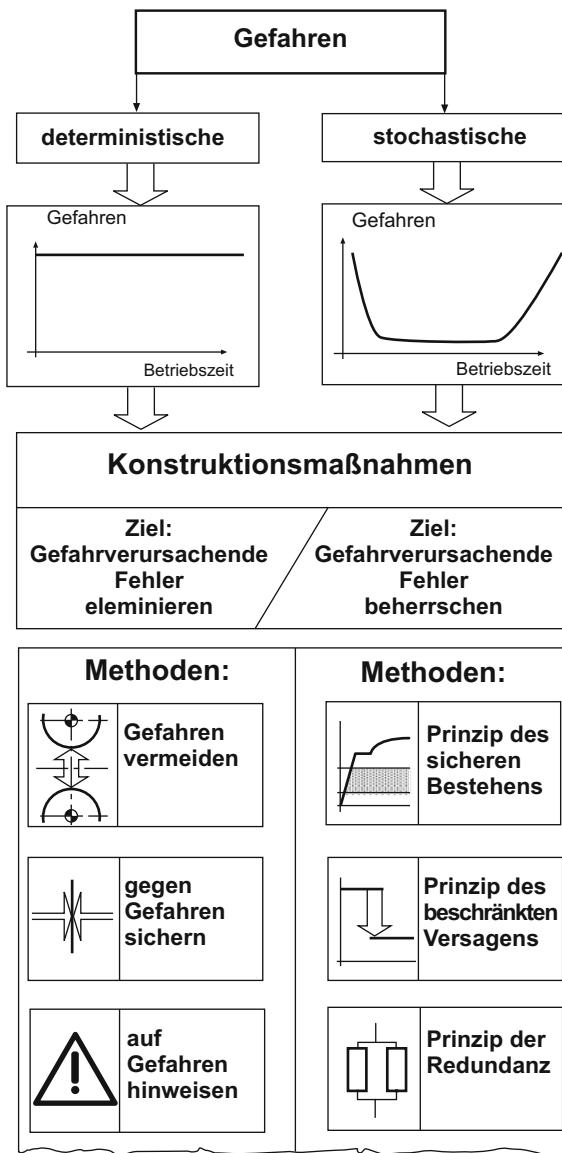
Oberstes Credo beim sicherheitsgerechten Konstruieren: Alle Gefährdungsarten müssen konstruktiv angegangen werden! Die dazu notwendigen Konstruktionsmaßnahmen müssen sowohl unvorhersehbaren, stochastischen als auch deterministischen, vorhersehbaren Gefährdungen entgegenwirken. Die unterschiedlichen Wirkungsweisen beider Gefährdungsarten bedingen auch unterschiedliche Konstruktionsmethoden, s. Abb. 11.16.

**Konstruktionsmaßnahmen gegen stochastische Gefährdungen** Stochastische Gefährdungen lassen sich vor allem auf Bauteilausfälle oder Softwarefehler zurückführen. Sie berühren die Zuverlässigkeit von Maschinen, können zwar, müssen aber nicht zwangsläufig die Sicherheit von Menschen beeinträchtigen. Die gegen sie gerichteten Konstruktionsmaßnahmen verfolgen das Ziel, die zeitabhängige Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass Maschinen innerhalb einer vereinbarten Betriebsdauer die ihnen zugesuchte Funktion erfüllen, störfest gegenüber zufälligen Bauteilausfällen bleiben und somit weder Menschen noch Umwelt schädigen. Die bekanntesten Konstruktionsmaßnahmen sind das

- Prinzip des sicheren Bestehens (safe life),
- Prinzip des beschränkten Versagens (fail safe) und
- Prinzip der Redundanz.

Maßnahmen des *safe-life-Prinzips* gehen davon aus, dass durch ausreichende Dimensionierung und funktionsgerechte Gestaltung die Maschine während der zugesicherten Lebensdauer so funktioniert, wie es vorgesehen ist: ohne Störungen, Ausfälle und die sich daraus ergebenden Gefahren. Das setzt voraus, dass

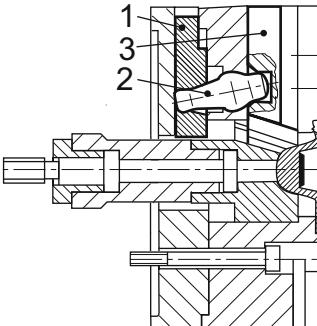
- alle Beanspruchungen, die auf die Maschine zukommen werden, bekannt sind,
- die angewendeten Berechnungsmethoden und das angenommene Werkstoffverhalten der Realität entsprechen und
- während der Lebensdauer der Maschine keine anderen Einflüsse als die in der Berechnung berücksichtigten auftreten werden.



**Abb. 11.16** Grundlegende Konstruktionsmaßnahmen zur Gefahrenabwehr und Risikobeherrschung

Wichtige Voraussetzung zum Erreichen eines zuverlässigen Verhaltens von Bauteilen und Baugruppen innerhalb der vorgesehenen Lebensdauer ist z. B. die konsequente Anwendung des Konstruktionsprinzips der Selbstverstärkung. Es verkehrt das Unvermeidliche ins Nützliche.

**Abb. 11.17** Prinzip der Selbstverstärkung am kraftbetätigten Spannzeug

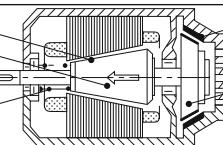
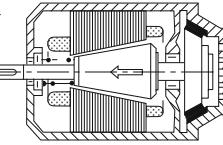
Spannzeug	Erläuterungen
	<p>Radial geführte Ausgleichsgewichte 1 verursachen Fliehkräfte, die mit zweiarmigen Hebeln 2 vergrößert, auf die Spannbacken 3 umgeleitet werden und dem Spannkraftabbau entgegenwirken.</p>

*Beispiel:* An Drehmaschinen stellen hohe Spindeldrehzahlen besondere Anforderungen an kraftbetätigte Spannfutter, da die an deren Spannbacken verfügbare Spannkraft mit steigender Drehzahl wegen der mit ihr quadratisch anwachsenden Fliehkräfte stark abfällt. Ab bestimmten Spindeldrehzahlen erfolgt keine zuverlässige Aufnahme und Übertragung der am Werkstück angreifenden Zerspanungskräfte. Das rotierende Werkstück kann sich lösen und eine stochastiche Gefährdung bilden. Mit dem Prinzip der Selbstverstärkung lässt sich die negative Wirkung technologisch bedingter und daher unvermeidbarer Fliehkräfte ins Positive umkehren, um sich spannkraftverstärkend auszuwirken, s. Abb. 11.17.

Zur Realisierung des Prinzips der Selbstverstärkung an einem Ziehkeilspannfutter werden Ausgleichsgewichte eingesetzt, um mit Fliehkräften Spannkräfte zu verstärken. Bei diesem Futter entstehen Spannkräfte durch axiales Ziehen eines Kegels mit hydraulischen oder pneumatischen Kolben. In seinem Mantel sind drei T-Nuten eingearbeitet, in denen je eine Spannbacken geführt ist. Durch Ziehen bewegen sich die Spannbacken im Grundkörper des Spannfutters radial auf die Drehachse zu. Die Keilwirkung in den T-Nuten erzeugt in ihnen Spannkräfte.

Die Ausgleichsgewichte sind im Grundkörper des Spannfutters hinter den Spannbacken radial und parallel zu ihnen geführt. Die auf sie ebenfalls einwirkenden, nach außen gerichteten Fliehkräfte werden mit einem zweiarmigen Hebel abgegriffen. Der Hebel lenkt ihre Wirkrichtung um 180° im Sinne der nach innen gerichteten Spannkräfte um und überträgt sie auf die Spannbacken. Das Verhältnis seiner Hebelarme ist so gewählt, dass es zugleich deren Betrag vergrößert.

Das *fail-safe-Prinzip* lässt bewusst Fehler zu. Die Systeme sind aber so konzipiert und gestaltet, dass ein sicherheitstechnischer Absturz nicht ins Bodenlose geht, sondern auf einem vereinbarten Niveau stehen bleibt. Auf Fehler – und das gilt nur für bekannte bzw. erkennbare und vorhersehbare Fehler – reagieren die Systeme, indem sie zur sicheren Seite „fallen“. Das setzt voraus, dass in diesen Systemen für die Normalfunktion immer genügend Energie gespeichert ist, die im Gefahrenfall abgebaut wird und das System in

Antriebsenergie	Bewegung	Bremse	Beispiel	Erläuterungen
1	2	3	Nr.	4
elektrische 	Rotation 	gelöst 	1	
			2	

**Abb. 11.18** Bremseinrichtungen nach dem Prinzip des beschränkten Versagens

einen energiearmen, stabilen Zustand überführt. Dieses Prinzip ist besonders wichtig bei Bremsen.

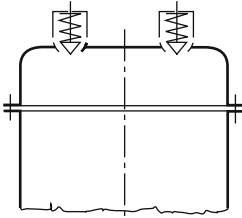
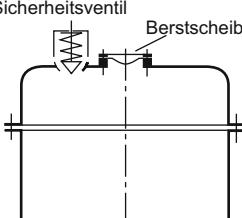
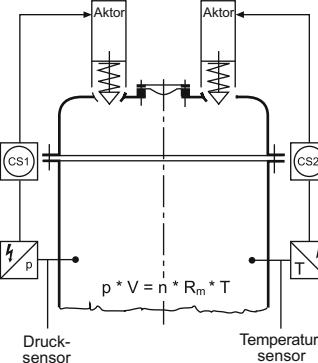
Bremsen wirken dann zuverlässig, wenn sie beim Bremsen ohne Zufuhr von informationstragender Hilfsenergie auskommen. Dies ist bei einem Energieausfall z. B. durch Leckage, Leitungsbruch oder Stromausfall wichtig. Dieser Effekt tritt nur dann ein, wenn die Energien, die sowohl zum Steuern als auch zum Aufbringen der Bremskraft benötigt werden, bereits im Bremssystem anderweitig, z. B. in Federn, gespeichert sind.

Die Bremswirkung setzt dann beim Unterbrechen des Energieflusses zwangsläufig ein und wird erst durch erneute Energiezufuhr aufgehoben. Das Konzept und die Bauteile des Bremssystems unterstützen sich dann gegenseitig. Die zur Sicherheitsbremsung bzw. -abschaltung notwendige Energie ist bei diesen Systemen intern gespeichert. Die gespeicherte Energie dient nicht nur zur Steuerung der Bremseinrichtungen, sondern wird auch zum Aufbringen der Bremskraft umgewandelt. Störungen oder Fehler im System geben diese Energie frei und lösen selbsttätig den Bremsvorgang aus. Der energiearme Zustand erzwingt den gefahrlosen Zustand des Systems, s. Abb. 11.18.

Bei laufendem Motor zieht das betriebliche Magnetfeld 1 den konischen Rotor 2 gegen die Feder 3 und die konische Bremsscheibe 4 aus dem Bremsring 5. Im stromlosen Zustand, d. h. ohne Magnetfeld, drückt die Feder den Rotor und die Bremsscheibe in die Bremsglocke zurück. Die Bremswirkung stellt sich sowohl beim gewollten Ausschalten als auch beim überraschenden Stromausfall zwangsläufig ein.

In redundanten Systemen sind zur Erfüllung der Funktion mehr Baugruppen vorgesehen, als es eigentlich notwendig wären. Man geht davon aus, dass im Falle des Versagens oder Ausfalls einer dieser Baugruppen die andere ihre Funktion vollständig übernimmt. Hier gilt der Grundsatz, mit möglichst wenig Redundanz möglichst viel Zuverlässigkeit zu erreichen.

Das Prinzip der Redundanz hat jedoch eine schwerwiegende Unzulänglichkeit: Gemeinsam Fehler verursachende Ausfälle (Common Mode Failure, CMF) setzen zwangsläufig das ganze redundante System außer Betrieb. Deshalb ist es notwendig, möglichst viele gemein-

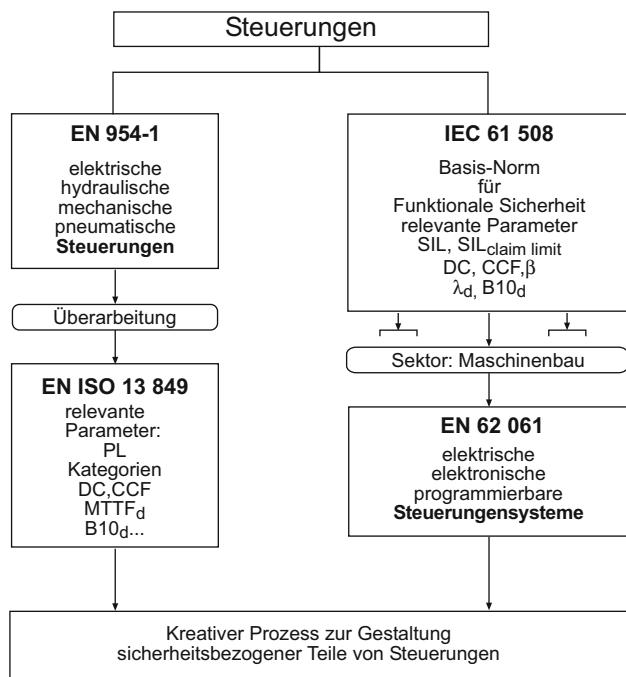
Redundanz	Beispiel	Erläuterungen
1	Nr.	3
homogene	1	 <p>Verdoppelung erhöht die Sicherheit nur dann, wenn keine systematischen Fehler auftreten können, z.B. Korrosion, Materialverwechslung, die beide Sicherheitseinrichtungen gleichzeitig unwirksam machen können.</p>
diversitäre (Bauteile)	2	 <p>Diversität im Wirkprinzip der Sicherheitsrichtung: Wechsel des Wirkprinzips macht ein gleichzeitiges Versagen der prinzipverschiedenen, gegenseitig unabhängigen Sicherheitseinrichtungen unterschiedlicher Hersteller unwahrscheinlich.</p>
diversitäre (Prozeßgrößen)	3	 <p>Diversität im physikalischen Prinzip: Jedes der zwei diversitär konstruierten gesteuerten Ventile wird von den Steuerungen CS1 bzw. CS2 aktiviert, die bei Grenzwertüberschreitung zweier über ein physikalisches Gesetz (z.B. allg. Zustandsgleichung) gekoppelter Prozessgrößen reagieren.</p>

**Abb. 11.19** Homogene und diversitäre Redundanz

same Fehler verursachende Störungen und Ausfallursachen im Voraus zu erkennen und zu berücksichtigen und ihnen mit diversitärem Aufbau entgegenzuwirken. Die Zuverlässigkeit erhöht sich bedeutend, wenn die redundanten Systeme voneinander unabhängig nach verschiedenen Wirkprinzipien arbeiten und räumlich getrennt installiert sind, s. Abb. 11.19.

Für alle drei Prinzipien zur Beherrschung stochastischer Gefährdungen (safe life, fail safe, Redundanz) gilt: Um eine zuverlässige Funktion der Maschinen zu erreichen, müssen Bauteile bzw. Baugruppen eindeutig, einfach und im Sinne des Prinzips der konsequenten

**Abb. 11.20** Normen für zuverlässige Steuerungen im Überblick

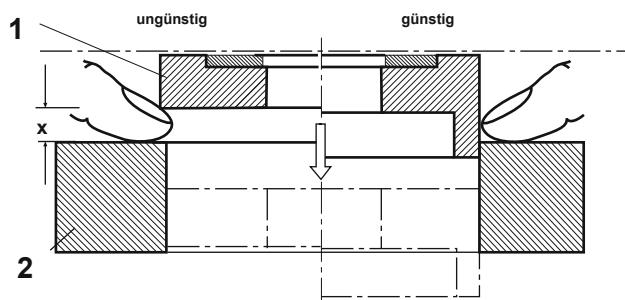


Aufgabenteilung konstruiert sein. Nur dann können Sicherheitsprinzipien möglichst vielen stochastischen Ausfällen und den mit ihnen gekoppelten Gefährdungen wirkungsvoll entgegenwirken und die Sicherheit der Maschinenbenutzer oder Dritter gewährleisten (Meyna und Pauli 2010).

Sobald eine technische Schutzmaßnahme von der zuverlässigen Wirkung einer Steuerung, genauer von deren sicherheitsbezogenen Teilen (z. B. von einem Schaltgerät oder einer speicherprogrammierbaren Steuerung), die wichtige Sicherheitsfunktionen, z. B. Not-Halt, sicher begrenzte Geschwindigkeit usw. realisieren, abhängt, bekommt die funktionelle Sicherheit der Steuerung, sprich deren sicherheitsbezogene Zuverlässigkeit, eine besondere Bedeutung. Sie lässt sich mit relativ aufwändigen Berechnungsverfahren bestimmen und auch informations- und gerätetechnisch realisieren (Autorengruppe 2008). Mehrere Normen legen auch vereinfachte Verfahren fest. Die verwendete Technik bzw. die informationstragende Energieart der Steuerung entscheidet über die Anwendbarkeit der jeweiligen Normen, s. Abb. 11.20. Wirkungsvolle Hilfestellungen zum Bewältigen dieser Aufgabe aus diesem Spezialgebiet der Sicherheitstechnik finden Anwender in Reinert und Schaefer (2001).

**Konstruktionsmaßnahmen gegen deterministische Gefährdungen** Deterministische Gefährdungen lassen sich auf den funktionellen Aufbau der Maschinen und die eingesetzten Verfahren zurückführen. Die gegen sie gerichteten Konstruktionsmaßnahmen verfolgen das Ziel, zu verhindern, dass sich latente Gefahren auf Menschen auswirken können. Im Laufe des technischen Fortschritts haben sich dazu drei Methoden entwickelt, s. Abb. 11.16.

**Abb. 11.21** Konstruktiv vermiedene Scherstelle



1. Unmittelbare Sicherheitstechnik
2. Mittelbare Sicherheitstechnik
3. Hinweisende Sicherheitstechnik

Im Unterschied zu den Maßnahmen gegen stochastische Gefährdungen, die grundsätzlich als gleichwertig angesehen werden, ist in der Maschinenrichtlinie für die Anwendung der jeweiligen Maßnahmen gegen deterministische Gefährdungen die obige Reihenfolge und Priorität verbindlich vorgeschrieben.

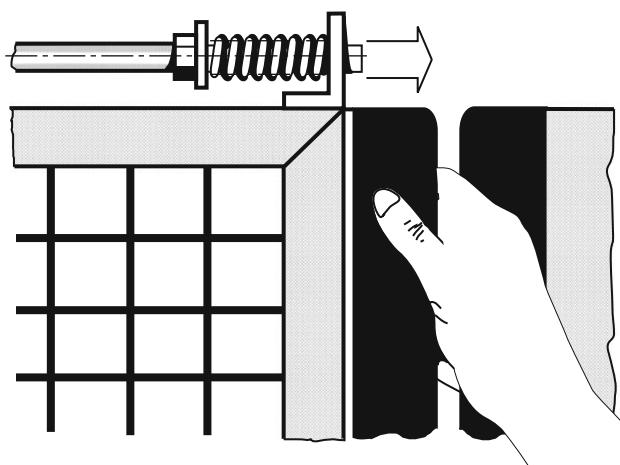
**Unmittelbare Sicherheitstechnik** Methoden der unmittelbaren Sicherheitstechnik versuchen, Baugruppen, Maschinen und Prozesse so zu gestalten, dass von ihnen keine oder nur geringe, akzeptierte Gefährdungen bzw. Risiken für Menschen ausgehen. Dazu stehen geometrische und energetische Maßnahmen zur Verfügung.

**Geometrische Maßnahmen.** Mit geometrischen Maßnahmen wird z. B. versucht, die gefährliche Wirkung von Gefahrstellen an bewegten Maschinenteilen zu vermeiden, indem man gefährliche Engstellen durch Einhalten von genormten Mindestabständen nach EN ISO 13 857 bzw. EN 349 gar nicht erst aufkommen lässt oder sie durch Einhalten von Sicherheitsabständen unerreichbar macht.

**Beispiel:** Beim Versuch, ein verkantetes Teil aus dem Werkzeug einer Kunststoffschweißmaschine zu entfernen, wurde dem Maschinenarbeiter mehrere Glieder des Zeige- und Mittelfingers der Gebrauchshand abgeschert. Werkzeuge der Schweißstation verbinden Kunststoffteile mit einer Folie. Das Unterwerkzeug 1 bewegt sich in einem Ring auf und ab. Befindet sich das Unterwerkzeug in der oberen Endlage, öffnet sich zwischen ihm und dem Ring 2 ein Ringspalt. Bei der Abwärtsbewegung entsteht im Freiraum (mit x bemaßt) eine Scherstelle ohne technologische Funktion. Diese Scherstelle lässt sich daher vermeiden. Wird das Unterwerkzeug durch Anbringen eines umlaufenden Borders so umgestaltet, dass es in der oberen Endlage mit seiner Unterkante nicht mehr aus dem Ring herausragt, ist der scherende Ringspalt ein für alle Mal verschwunden. Die Gefahrstelle hat aufgehört zu existieren, s. Abb. 11.21.

**Energetische Maßnahmen.** Energetische Methoden versuchen, dass sich die den Gefährdungen zu Grunde liegenden Energien nicht schädigend auf Menschen auswirken können:

**Abb. 11.22** Elastische Schließkanten an Schutzeinrichtungen



- Begrenzen der wirksamen Energien,
- Unterbrechung des Energieflusses zum Menschen hin und
- zielgerichtete Verformung der Maschinenteile.

Mit dem Begrenzen der wirksamen Energien versucht man, die in einer Gefahrstelle aufkommenden Energien und Kräfte so zu bemessen, dass ihre Auswirkung unterhalb verträglicher physiologischer Werte bleibt. Dieses Energieniveau ist aber meistens technologisch nur beschränkt nutzbar.

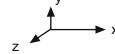
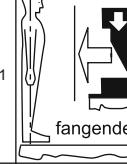
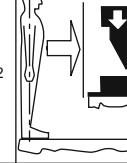
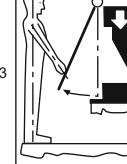
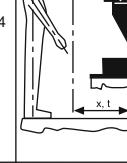
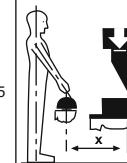
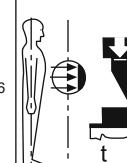
Das Unterbrechen des Energieflusses zum Menschen hin verhindert die schädigende Wirkung auf Menschen, indem sie den Energie- oder Kraftfluss noch vor dem Erreichen der Schmerzgrenze unterbricht.

*Beispiel:* Bei der zielgerichteten Verformung der Maschinenteile setzt man die Steifigkeit der Maschinenteile soweit herab, dass sich beim Hineingeraten in die Gefahrstelle die Maschinenteile und nicht Körperteile verformen, s. Abb. 11.22.

Die unmittelbare Sicherheitstechnik lässt sich nicht auf Gefahrstellen mit technologischen Funktionen anwenden. Deren Gefahren müssen mit besonderen Maßnahmen mit Schutzeinrichtungen gesichert werden. Schutzeinrichtungen bilden den Schwerpunkt der mittelbaren Sicherheitstechnik.

**Mittelbare Sicherheitstechnik** Baugruppen der mittelbaren Sicherheitstechnik sichern Gefahren, die zur Funktion der Maschinen notwendig sind und sich daher nicht vermeiden lassen. Schutzeinrichtungen sind zwischen Menschen und Gefahr angeordnet und unterbrechen die Möglichkeit des räumlichen und zeitlichen Zusammentreffens. Dazu werden trennende oder nichttrennende Schutzeinrichtungen verwendet, s. Abb. 11.23.

*Nichttrennende Schutzeinrichtungen*, z. B. Zweihandschaltungen oder Lichtschranken, verhindern zwar nicht den Zugriff/Zutritt zu gefährlichen Situationen, machen sie aber

Schutz gegen	Unterbrechung des Wirkzusammenhangs	Wirkung durch	Schema		Benennung	Beispiele	Erläuterungen
1	2	3	Nr.	4	5	6	7
<b>Gefahrquellen</b> 	<b>räumlich</b> 	<b>ruhende materielle Sperren</b> 	1	 fangende	<b>feststehende trennende Schutzeinrichtung</b>	Fanghauben, Schulzaufbauten an Erdbau-Maschinen (ROPS,FOPS)	Schutzeinrichtungen halten die sich unkontrolliert bewegenden Teile zurück, absorbieren deren kinetische Energie und verhindern, dass sie Personen erreichen.
			2			Verkleidungen, Verdeckungen, Umzäunungen	Schutzeinrichtungen trennen in der Schutzstellung materiell Gefahrstellen vom Arbeits- und Verkehrsreich. Personen können Gefahrstellen nicht erreichen.
	<b>räumlich und zeitlich</b>  	<b>bewegte materielle Sperren</b> 	3		<b>abweisende Schutzeinrichtung</b>	Finger-abweiser, Hand-abweiser	Schutzeinrichtungen sind kinematisch mit gefahrbringenden Bewegungen gekoppelt. Sie entfernen formschlüssig Personen aus Gefahrenbereichen.
			4			mit Positions-schaltern überwachte Verkleidungen, Umzäunungen	Öffnen der Schutzeinrichtung unterbricht die gefahrbringende Bewegung und hebt die materielle Trennung der Gefahrstelle von Menschen auf. Seine Sicherheit hängt jetzt von der zuverlässigen Funktion sicherheits-relevanter Teile der Steuerung ab.
		<b>steuerungs-technische Maßnahmen</b> 	5		<b>ortsbindende Schutzeinrichtung</b>	Zustimmschalter, Tipschalter, Zweihand-schaltungen	Schutzeinrichtungen binden während der gefahr-bringenden Bewegung Personen an einen sicheren Ort, von dem aus sie Gefahrstellen nicht erreichen können. Beim Verlassen des sicheren Ortes stoppt die gefahrbringende Bewegung.
			6		<b>Schutzeinrichtung mit Annäherungsreaktion</b>	opto-elektronische kapazitive Sensoren, Schalteleisten, Trittschaltmatten, Lichtgitter, Scanner	Schutzeinrichtungen verhindern Gefährdungen durch Unterbrechen gefahrbringender Bewegungen, sobald Personen sichere Grenzen überschreiten und sie sich der Gefahrstelle nähern.

**Abb. 11.23** Grundtypen von Schutzeinrichtungen

unwirksam, indem sie über die Steuerung der Maschine auf den Bearbeitungsprozess einwirken, sobald sie aktiviert werden. Bei ihnen handelt es sich meist um Schutzsysteme, da ihre zuverlässige Wirkung von der funktionellen Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Teile der (Maschinen-)Steuerung abhängt.

*Trennende Schutzeinrichtungen*, z. B. Schutzgitter oder Hauben, bilden materielle Barrieren, die den Zutritt bzw. Zugriff zu gefährlichen Situationen mit ihrer Undurchdringlichkeit verhindern. Zusätzlich können sie verhindern, dass Menschen von Gegenständen getroffen werden, die aus den geschützten Bereichen herausgeschleudert werden.

Trennende Schutzeinrichtungen unterbinden durch materielle Barrieren das räumliche und zeitliche Zusammentreffen von Menschen mit gefährlichen Situationen. Neben den zu lösenden Fragen zur Werkstoffwahl und der Berücksichtigung mechanischer Gesichtspunkte, wie z. B. Festigkeit, müssen sicherheitstechnische und ergonomische Aspekte berücksichtigt werden. Sie entscheiden nicht nur über die Qualität der Schutzfunktion, sondern auch darüber, ob die mit erheblichem Aufwand konstruierten und gefertigten Schutzeinrichtungen von den Beschäftigten bereitwillig benutzt, abgelehnt oder gar manipuliert werden.

Grundlegende Anforderungen an deren Gestaltung enthalten die EN 953 und EN 1088 (zukünftig EN ISO 14119). Die wichtigsten sicherheitstechnischen Gesichtspunkte sind die Abstimmung der Maschenweite und des Abstandes der Schutzeinrichtung bzw. der Zusammenhang zwischen Öffnungsweite tunnelartiger Verdeckungen und des Abstandes zur Gefahrstelle gemäß EN ISO 13 857.

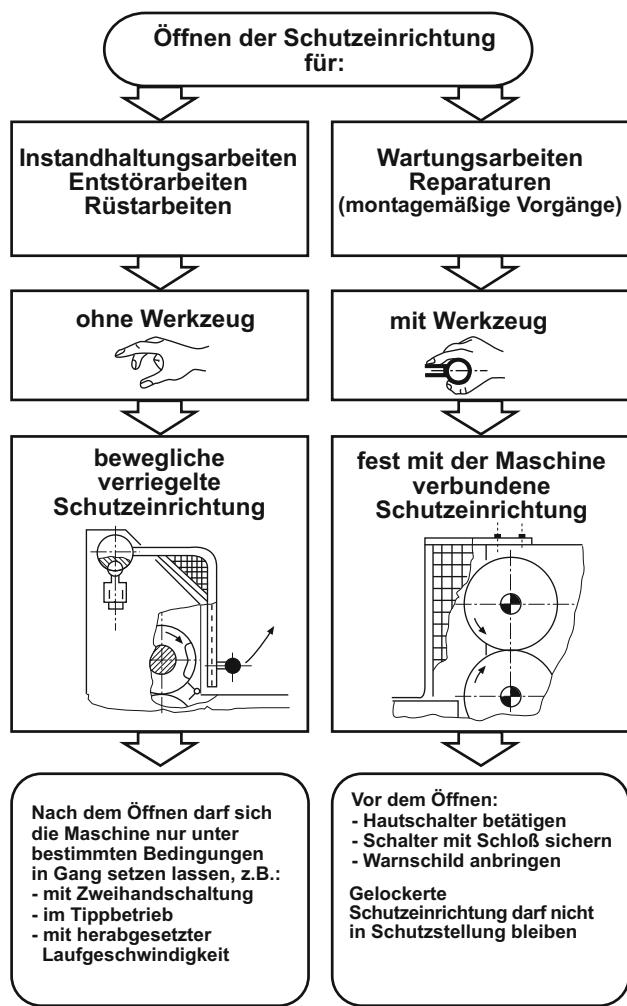
Ergonomische Gesichtspunkte entscheiden über die Handhabbarkeit und damit über die Akzeptanz von Schutzeinrichtungen. Die wichtigste ergonomische Anforderung besteht darin, dass die Beschäftigten beim täglichen Hantieren mit der Schutzeinrichtung nicht mehr als notwendig beansprucht werden dürfen.

Die Erfahrung zeigt, dass trotz aller Beteuerungen nahezu jede trennende Schutzeinrichtung im Laufe der Zeit einmal abgenommen oder geöffnet werden muss. Grundsätzlich gilt, dass auch bei geöffneten Schutzeinrichtungen Gefährdungen möglichst vermieden und Beschäftigte vor Gefahren geschützt werden sollen. Über die Befestigungs- und Überwachungsmodalitäten der Schutzeinrichtungen entscheiden der Öffnungsgrund sowie das Risiko für Tätigkeiten, die hinter geöffneten Schutzeinrichtungen durchzuführen sind, s. Abb. 11.24.

Müssen Schutzeinrichtungen nur für Wartungs- oder Reparaturarbeiten geöffnet werden, also für Arbeiten, die mit Werkzeugen durchgeführt werden oder einen Montagevorgang bedeuten, so sind Schutzeinrichtungen mit dem Maschinengestell so zu verbinden, dass sie sich auch nur mit Werkzeug lösen lassen.

Müssen Schutzeinrichtungen betriebsmäßig oder häufig (zur Orientierung: mindestens einmal pro Arbeitsschicht für Sonderbetriebsarten) geöffnet werden, muss dies ohne Werkzeug möglich sein. Dann muss aber die Öffnung in Gefahr bringenden Situationen verriegelt oder zugehalten sein. Damit dann die bei geöffneten Schutzeinrichtungen notwendigen Tätigkeiten mit akzeptablen Risiken durchgeführt werden können, müssen weitergehende

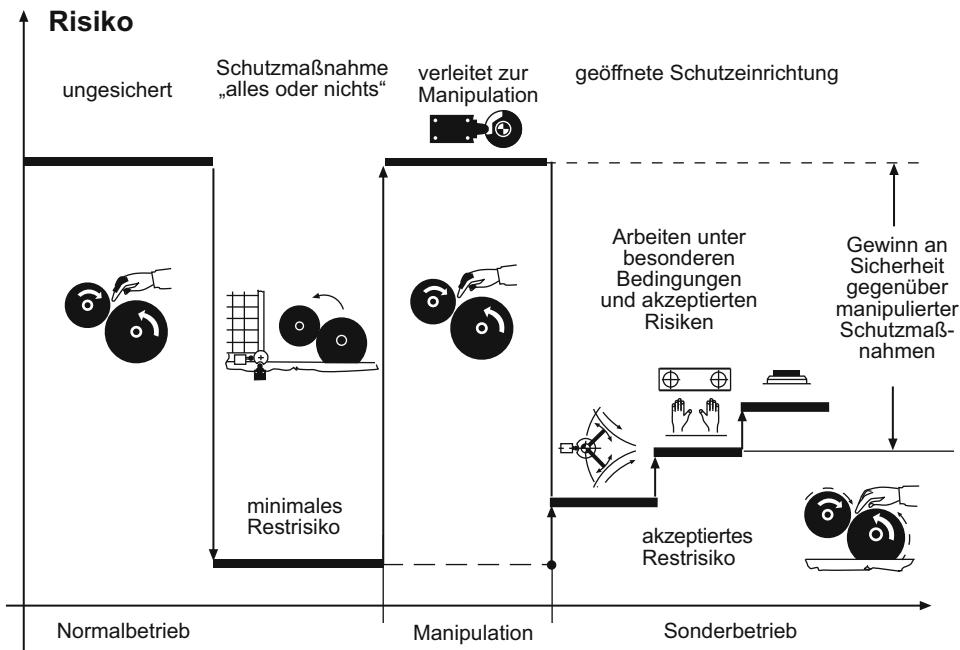
**Abb. 11.24** Öffnungsmodalitäten an Schutzeinrichtungen



Schutzmaßnahmen mit dem sich jetzt ergebenden Risiko sowie mit (antriebs-)technischen und technologischen Gegebenheiten abgestimmt sein.

Dieses Vorgehen ist konform mit der Maschinenrichtlinie! Sie gestattet nämlich das Arbeiten bei geöffneten Schutzeinrichtungen als Sonderbetriebsart sicher zu gestalten und diese Tätigkeiten zugleich auf eine legale Basis zu stellen.

Denn wenn Verriegelungen so konzipiert werden, dass nach dem Öffnen der Schutzeinrichtung überhaupt keine Bewegung der Maschine oder deren Baugruppen möglich ist, provoziert dies nur Manipulationen und sicherheitswidriges Verhalten! Dieses Risiko lässt sich mit einem abgestuften Bündel von Maßnahmen (z. B. zusätzliche schaltende Schutzeinrichtungen, Zweihandschaltung, Tippbetrieb) beherrschen, s. Abb. 11.25.



**Abb. 11.25** Sicherheitskonzept für Sonderbetriebsarten

Ungeachtet dieser Konstruktionsmaßnahmen müssen die Hersteller ihrer Informationspflicht nachkommen. Vor allem müssen sie in der Betriebsanleitung alle Modalitäten für die sichere Durchführung der Sonderbetriebsarten verbindlich festlegen und verbleibende Restrisiken peinlichst genau auflisten!

**Verriegelungen und Zuhaltungen** Zum Einleiten der Sonderbetriebsarten werden an trennenden Schutzeinrichtungen Verriegelungen, Verriegelungen mit Zuhaltungen (kurz Zuhaltungen genannt) und Verriegelungen mit Startfunktion als funktionelle Kopplungen eingesetzt, s. Abb. 11.26.

Bei Verriegelungen muss dem bewussten Öffnen der Schutzeinrichtung das Stoppen gefahrbringender Bewegungen hinter der Schutzeinrichtung folgen, dem gefahrlosen Zustand muss also eine bewusste Handlung vorausgehen.

Bei Verriegelungen mit Zuhaltungen müssen erst hinter der Schutzeinrichtung gefahrlose Zustände eingetreten sein, bevor sie sich öffnen lässt.

Verriegelungen mit Startfunktion ermöglichen durch Schließen der Schutzeinrichtung gefahrbringende Situationen im Wirkbereich unmittelbar einzuleiten, unabhängig davon, nach welchem Modus (Verriegelung, Verriegelung mit Zuhaltung) die Schutzeinrichtung vorher geöffnet wurde.

Funktionelle Kopplung der Schutzeinrichtung	Öffnungszustand der Schutzeinrichtung		
	geschlossen $\Rightarrow$ öffnen	geöffnet	schließen $\Rightarrow$ geschlossen
		gefährdende Maschinenfunktion z.B. gefahrbringende Bewegung	
1	Nr.	2	3
<b>Verriegelung</b>	1	Stoppt durch Öffnen der Schutzeinrichtung und muss vor dem Erreichen der Gefahrstelle abgeklungen sein.	Darf nicht oder nur unter festgelegten Risiken und Bedingungen an- und ablaufen.
<b>Verriegelung mit Zuhaltung</b>	2	Stoppt als Folge des Halt-Befehls und muss vorm Öffnen der Schutzeinrichtung abgeklungen sein.	
<b>Verriegelung mit Startfunktion</b>	3	Wurde durch Öffnen der Schutzeinrichtung (1) oder durch Halt-Befehl (2) gestoppt und ist abgeklungen.	Darf nach Schließen der Schutzeinrichtung nicht anlaufen.  Läuft nach Schließen der Schutzeinrichtung an.

**Abb. 11.26** Funktionelle Kopplungen trennender Schutzeinrichtungen

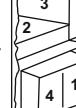
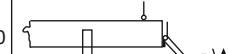
**Hinweisende Sicherheitstechnik** Die hinweisende Sicherheitstechnik, als letzte Möglichkeit zur Bekämpfung deterministischer Gefährdungen, versucht mit ihren Methoden, z. B. mit Sicherheitsschildern, Unterweisungen usw., bei gefährdeten Personen durch gezielte Botschaften und Informationen ein sicherheitsgerechtes Verhalten zu bewirken.

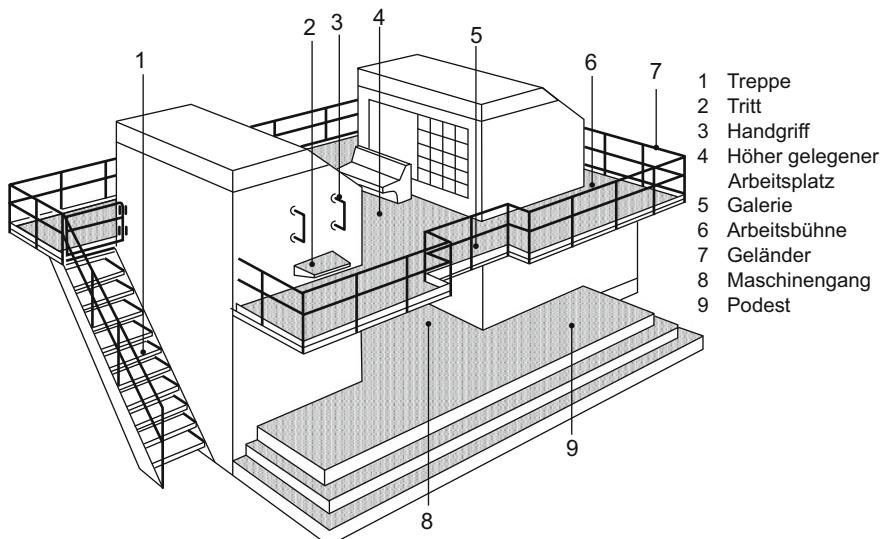
Hersteller müssen dafür sorgen, dass Maschinenbenutzer drohende Gefahren rechtzeitig erkennen können. Sie müssen Gefahren so verhaltenswirksam anzeigen, dass die Gefährdeten zum sicherheitsgerechten Verhalten angehalten werden. Das kann sich allerdings erst dann einstellen, wenn Betroffene auch wissen, was sie nach der angezeigten Warnung zu tun haben und auch in der Lage sind, es zu tun. Hinweisende Sicherheitstechnik darf daher niemals als alleinige Maßnahme angewendet werden. Hinweisende Sicherheitstechnik muss auf künstliche Informationsquellen zurückgreifen, deren Botschaft die Gefährdeten mit ihren Sinnen aufnehmen und sie verstehen können, s. Abb. 11.27.

Alle Maßnahmen der hinweisenden Sicherheitstechnik sind untrennbar mit betrieblichen Unterweisungen und Betriebsanweisungen verbunden. In der zur Maschine gehörenden Begleitdokumentation sollten Hersteller im eigenen Interesse die Betreiber auf deren Verpflichtung hinweisen, Betriebsanleitungen zu erstellen und Unterweisungen durchzuführen. Hinweisende Sicherheitstechnik ist das schwächste Glied in der Sicherheitskette, da sie auf Handlungen abzielt, die vom mehr oder weniger ausgeprägten Sicherheitsbewusstsein der Maschinenbenutzer abhängen.

**Sicherheitstechnische Besonderheiten großer Maschinen** Groß und klein ist relativ. Haben Maschinen aber Dimensionen erreicht, die es unmöglich machen, von der Flurebene aus an oder mit ihnen zu arbeiten, sind sie auch meistens so unübersichtlich, dass eine

**Abb. 11.27** Mittel der hinweisenden Sicherheitstechnik

Informationsparameter			Beispiel	
Kanal	Verlauf	Träger	Nr.	4
 visuell	 dynamisch	 Text	1	Betriebsanleitung
			2	Schweißarbeiten Augen gefährdet
		 Bildzeichen	3	Stop, Anhalten einer Bewegung   Schnellstop ISO 7000
		 Sicherheits- zeichen	4	  
			5	 Farbkombination: gelb-schwarz (permanente Gefahr) rot-weiß (temporäre Gefahr)
		 Lichtsignale	6	
			7	 1 • Hauptmotor 2 • Einfürtisch offen 3 • Haube offen 4 • keine Druckluft 5 • Folie gebrochen 6 • Magazin leer
		 Prozess- visuali- sierung, Simulation	8	
			9	 
 auditiv	 taktil	 bewegte Gegenstände	10	ausweichende Schutzeinrichtung



**Abb. 11.28** Äußere Funktionselemente und Baugruppen für den Höhenausgleich

unmittelbare Kommunikation zwischen den Beschäftigten nur schwer möglich ist. Solche Maschinen bergen besondere Risiken durch Abstürze.

Grundsätzlich gilt, dass zum Bedienen, Rüsten, Entstören und Instandhalten Beschäftigte in jeder Höhe über der Flurebene auf sicheren Boden gehen, stehen oder sitzen können müssen. Deshalb müssen Konstruktionsmaßnahmen gegen Absturzgefahren getroffen werden.

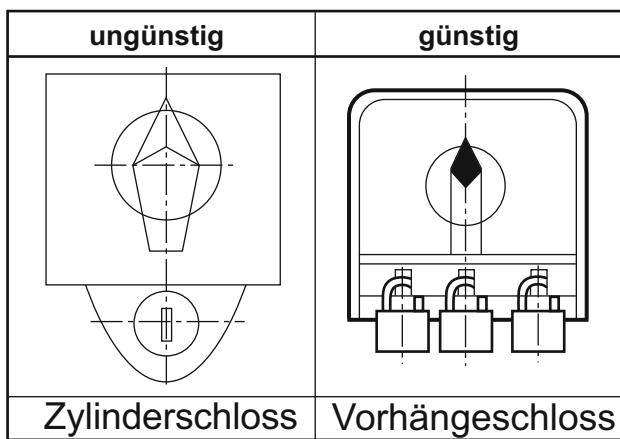
Auf- und Absteigen darf nicht dem Einfallsreichtum der Beschäftigten vor Ort überlassen werden. Deshalb müssen an großen Maschinen mit hoch liegenden Arbeitsplätzen sichere Zugänge bzw. Durchgänge und Arbeitsbühnen vorhanden sein, s. Abb. 11.28.

Sind diese Einrichtungen sicherheitstechnisch und ergonomisch ungünstig gestaltet oder positioniert, können sie Beschäftigte gefährden oder unfallträchtige Situationen heraufbeschwören.

Welche Aufstiegshilfen (Tritte, Steigleiter, Maschinentreppen) benutzt werden müssen, hängt hauptsächlich davon ab, wie häufig (wöchentlich, täglich) die Aufstiege benutzt werden müssen sowie ob und welche Gegenstände dabei getragen werden müssen. Gewicht und Sperrigkeit der Gegenstände sind hierbei von besonderer Bedeutung. Bei allen Aufstiegshilfen muss der Absturzgefahr mit Geländern und Handläufen entgegengewirkt werden. Werden einzelne Tritte als Aufstiegshilfe verwendet, dürfen griffigünstig positionierte Handgriffe nicht vergessen werden, damit sich Beschäftigte an ihnen festhalten können.

Treppen müssen so gestaltet sein, dass sie sich sicher begehen lassen. Von besonderer Bedeutung sind eine ausreichende Breite und gleichmäßige Stufenhöhen und Auftrittsflä-

**Abb. 11.29** Abschließbare Hauptbefehleinrichtungen



chen. Statt den Beschäftigten unsichere Improvisationen zuzumuten, sollte man sich für eine sichere Minimallösung entscheiden, die nicht unterschritten werden darf.

Der Höhenausgleich kann mit Podesten oder Arbeitsbühnen erfolgen. Mit Podesten (Arbeitsbühnen von etwa 200 mm bis 500 mm Höhe) lässt sich die Diskrepanz zwischen der von der Maschine fest vorgegebenen Arbeitshöhe und der Körpergröße der Beschäftigten ausgleichen.

Höhere Arbeitsbühnen müssen mit Absturzsicherung ausgerüstet sein. Genormte Geländer bieten ausreichende Sicherheit.

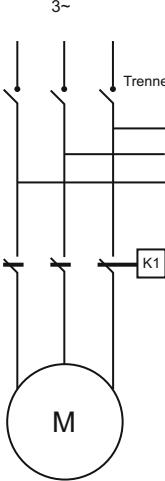
Bei Durchgängen zwischen einzelnen Maschinengruppen ist schon in den frühen Phasen des Konstruierens auf ein ausreichend hohes lichtes Profil zu achten. Stoßstellen, verursacht durch zu niedrige Durchgangshöhen lassen sich nachträglich kaum noch korrigieren.

**Hauptschalter** Sie haben die Aufgabe, die Maschine im Bedarfsfall, z. B. um Reparaturarbeiten durchzuführen, von der Energieversorgung zuverlässig und eindeutig zu trennen. Das gilt nicht nur für die elektrische Ausrüstung, sondern auch für die Pneumatik und Hydraulik, s. Abb. 11.29.

Hauptschalter dürfen jeweils nur eine Ein- und eine Ausschaltung haben. Beide Schaltstellungen müssen gekennzeichnet sein. Beginn und Ende der Energiezufuhr müssen ausschließlich von den mit den Reparaturarbeiten Beschäftigten bestimmbar sein. Deshalb müssen Hauptschalter im ausgeschalteten Zustand abschließbar sein.

Am zuverlässigsten sind Hauptschalter, die sich mit mehreren Vorhängeschlössern abschließen lassen. So kann sich jeder an der Maschine Beschäftigte (Elektriker, Maschinenführer, Schlosser) unabhängig vom anderen sichern. Erst wenn das letzte Schloss entfernt ist, lässt sich der Hauptschalter in die „EIN“-Stellung zurückschalten.

**Not-Halt-Schalter** Not-Befehleinrichtungen sind als letzte Chance gedacht, alle drohenden oder unmittelbaren Gefahren für Personen oder aufkommende Schäden für die

Handlung im Notfall	Ziel	Stop-Kategorie	Schema	Erläuterungen	
1	2	Nr.	3	4	5
<b>Erwartung</b>	Gefahrbringende Situation, schnellstens beenden, ohne neue Gefahren zu erzeugen	1			Not-Befehleinrichtung muss auch dann zuverlässig funktionieren, wenn sie nach langer Zeit zum ersten Mal aktiviert wird.
<b>Ausschalten</b>	Schutz vor elektrischem Schlag oder vor anderen Gefährdungen elektrischen Ursprungs	2	0		<b>Not-AUS/Emergency SWITCHING OFF:</b> Lasttrennschalter ist an einen (Einspeise-) Schaltschrank platziert, damit von dieser Stelle aus ein Anlageteil oder die gesamte Anlage spannungsfrei geschaltet werden kann. Schutz gegen elektrischen Schlag. s.a.Kap. 6.4
<b>Stillsetzen</b>	Schutz vor gefahrbringender Situation, z. B. vor gefahrbringenden Bewegungen	3	0 oder 1		<b>Not-HALT/Emergency STOP:</b> Befehleinrichtungen sind unmittelbar am Arbeitsplatz einer Maschine leicht erreichbar platziert, damit gefährdete Personen oder Dritte beim Erkennen unmittelbar drohender, oder eingetretener gefahrbringenden Situationen diese schnellstens stoppen können: Schutz vor einer Gefährdung oder Verletzung.

**Abb. 11.30** Funktion von Not-Befehleinrichtungen nach ISO 13850 und EN 60204-1

Maschine oder das Arbeitsgut, die vom Arbeitsmittel ausgehen, abzuwenden. Die Not-Befehleinrichtungen sind immer nur flankierende Schutzmaßnahmen und dürfen niemals als primäre oder gar alleinige Schutzmaßnahmen missdeutet werden, s. Abb. 11.30.

Not-Befehleinrichtungen können die Funktion Not-Aus (Schutz vor elektrischen Gefahren) und die Funktion Not-Halt (Schutz vor Gefahr drohenden Situationen nichtelektrischen Ursprungs) realisieren (Gehlen 2007).

Not-Halt-Schalter müssen als rote, pilzförmige oder palmenförmige Druckknöpfe vor einem gelben Hintergrund ausgeführt sein. Ihr Schaltmechanismus muss so ausgelegt sein, dass Kontakte nach dem Betätigen zwangsläufig und zuverlässig öffnen und danach verrasten und dieser Schaltzustand auch erhalten bleibt. Der einmal eingeleitete Betätigungsvergang darf sich z. B. nicht durch leichtes Antippen oder feinfühliges Spielen rückgängig machen lassen.

Not-Halt-Schalter müssen nach dem Betätigen verriegelt bleiben. Entriegeln muss von Hand vor Ort geschehen, damit der Anlass der Betätigung unmittelbar überprüft wird. Damit ist sichergestellt, dass Verantwortliche anomalen Zuständen nachgehen, und zugleich ist verhindert, dass Not-Halt-Schalter zu betriebsmäßigen Ein- und Ausschaltern umfunktioniert werden.

*Fazit:* Es wird so gut wie unmöglich sein, nur mit einer einzigen der aufgezählten Konstruktionsmaßnahmen eine Maschine mit akzeptiertem Risiko zu bauen. Vielmehr müssen Maßnahmen mit ihren Methoden aufeinander abgestimmt sein, um sich zu ergänzen und funktionell zusammenzuwirken.

---

## Literatur

### Abschnitt 11.1

Schmid E (1969) Theoretische und experimentelle Untersuchung des Mechanismus der Drehmomentübertragung von Kegel-Press-Verbindungen. VDI Fortschrittsberichte Reihe 1, Nr 16. VDI, Düsseldorf

### Abschnitt 11.2

Leyer A (1963–1978) Maschinenkonstruktionslehre, Hefte 1–7. technica-Reihe. Birkhäuser, Basel  
Niemann G (2001) Maschinenelemente, Bd 1. Springer, Berlin (2. Aufl. 1975, 3. Aufl. 2001)  
Pahl G (1963) Konstruktionstechnik im thermischen Maschinenbau. Konstruktion 15:91–98

### Abschnitt 11.3

Autorenengemeinschaft (2008) Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen – Anwendung der EN ISO 13 849, BGIA-Report 2/2008, DGUV, Sankt Augustin  
Börcsök J (2008) Funktionale Sicherheit. Hüthig, Heidelberg  
Eberhardt O (2008) Gefährdungsanalyse mit FMEA. expert, Renningen  
Gehlen P (2007) Funktionelle Sicherheit von Maschinen und Anlagen. Siemens AG (Hrsg), Publicis Corporate Publishing, Erlangen  
Hüning A, Kirchberg S, Schulze M (2006) Die neue EG-Maschinenrichtlinie. Bundesanzeiger, Köln  
Klindt T (2004) Das neue Geräte- und Produktsicherheitsgesetz, Neue Juristische Wochenschrift 57(8):465–471  
Krey V, Kapoor A (2009) Praxisleitfaden Produktsicherheitsrecht. Hanser, München  
Meyna A, Pauli B (2010) Zuverlässigkeitstechnik – Quantitative Bewertungsverfahren. Hanser, München  
Neudörfer A (2013) Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte. Springer, Heidelberg  
Preuße C (2008) Maschinen sicher konstruieren. Carl Heymanns, Köln  
ProdSG (2011) Produktsicherheitsgesetz vom 1.12.2011  
Reinert D, Schaefer M (Hrsg) (2001) Sichere Bussysteme für die Automation. Hüthig, Heidelberg  
Reudenbach R (2012) Sichere Maschinen in Europa. Teil 3: Risikobeurteilung. Verlag Technik & Information, Bochum  
Schulz M (2008) Risikobeurteilung/Gefahrenanalyse für Maschinen, Anlagen, Apparate und Medizinprodukte. GFT, Schenkenzell  
Wratil P, Kieviet M, Röhrs W (2010) Sicherheit für Maschinen und Anlagen. VDE-Verlag, Berlin

## Richtlinien

EMV-Richtlinie (2004/40/EG) Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen

Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) Richtlinie des Rates der Europäischen Union und des Europäischen Parlaments vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)

Niederspannungs-Richtlinie (2006/95/EG) Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen

## Normen

EN 953 (2009) „Sicherheit von Maschinen – Trennende Schutzeinrichtungen – Allgemeine Anforderungen an die Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen“, Juli 2009

EN 1088 (2008) „Sicherheit von Maschinen – Verriegelungseinrichtungen in Verbindung mit trennenden Schutzeinrichtungen – Leitsätze für Gestaltung und Auswahl“, Oktober 2008

EN 60 204 (2007) „Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen“, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Juni 2007

EN ISO 12 100 (2011) „Sicherheit von Maschinen – Grundbegriffe“, Februar 2011

EN ISO 13 850 (2009) „Sicherheit von Maschinen – Not-Halt – Gestaltungsleitsätze“, September 2009

EN ISO 13 857 (2008) „Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen“, Juni 2008

ISO 7000 (2008) „Grafische Symbole auf Einrichtungen – Index und Übersicht“, Dezember 2008

Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen  
und Karl-Heinrich Grote

Übergeordnete Prinzipien zur zweckmäßigen Gestaltung sind in der Literatur mehrfach formuliert worden. Kesselring (1954) stellte die Prinzipien der minimalen Herstellkosten, des minimalen Raumbedarfs, des minimalen Gewichts, der minimalen Verluste und der günstigsten Handhabung auf. Leyer spricht u. a. vom Prinzip des Leichtbaus (Leyer 1974) und vom Prinzip der gleichen Wanddicke (Leyer 1963–1978). Es ist einsichtig, dass nicht alle Prinzipien zugleich in einer technischen Lösung verwirklicht werden können oder sollen. Eines der genannten Prinzipien kann wichtig und maßgebend sein, andere wünschenswert. Welches im Einzelnen maßgebend sein soll, lässt sich immer nur aus dem Wesenskern der Aufgabe und aus dem Fertigungshintergrund ableiten. Ihre übergeordnete Bedeutung ist damit gegenüber den Grundregeln in Kap. 11, die immer gelten, eingeschränkt. Durch methodisches Vorgehen und Aufstellen einer Anforderungsliste und durch einen Abstraktionsvorgang zum Erkennen des Wesenskerns der Aufgabe sowie durch Befolgen der Leitlinie werden die o. g. Prinzipien von Kesselring und Leyer in der Regel ohnehin in konkrete, zur Aufgabe in Relation stehende Gestaltungen umgesetzt. Durch die geklärte Aufgabenstel-

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

G. Pahl

Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

W. Beitz<sup>†</sup>

Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

lung werden nämlich maximal zulässige Herstellkosten, größter Raumbedarf, zulässiges Gewicht usw. im Allgemeinen angegeben und festgelegt.

Dagegen stellt sich heute beim methodischen Vorgehen die Frage, wie bei gegebener Aufgabenstellung und gewählter Wirkstruktur eine Funktion durch welche Art und welchen Aufbau von Funktionsträgern am besten erfüllt werden kann. Gestaltungsprinzipien solcher Art helfen eine Baustuktur zu entwickeln, die den jeweiligen Anforderungen gerecht wird.

Die Gestaltungsprobleme konzentrieren sich zunächst im Wesentlichen auf Fragen der Leitung, Verknüpfung und Speicherung. Für die häufig wiederkehrende Aufgabe, Kräfte oder Momente zu leiten, ist es naheliegend, „Prinzipien der Kraftleitung“ aufzustellen. Aufgaben, die eine *Wandlung* der Art oder Änderung der Größe erfordern, werden in erster Linie durch entsprechendes physikalisches Geschehen erfüllt, aber der Konstrukteur hat dabei das „Prinzip der minimalen Verluste“ (Kesselring 1954) aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen zu beachten, was durch Wandlungen mit hohem Wirkungsgrad und mit wenigen Wandlungsstufen erreicht wird. Eine Umkehrung dieses Prinzips ermöglicht die Vernichtung einer bestimmten Energieart und Wandlung in eine andere für die Fälle, wo es gefordert oder nötig wird. *Speicheraufgaben* führen zu einer Ansammlung von potenzieller und kinetischer Energie, sei es durch direkte Energiespeicherung oder auch nur indirekt durch die Anhäufung von Stoffmassen oder von Trägerenergie für zu speichernde Signale. Die Speicherung von Energie wirft aber die Frage nach stabilem oder labilem Verhalten des Systems auf, so dass sich Gestaltungsprinzipien der Stabilität und der Bistabilität hiervom ableiten und entwickeln lassen.

Oft sind mehrere Funktionen mit einem oder mehreren Funktionsträgern zu erfüllen. So kann hinsichtlich der Trennung von Teilfunktionen mit Hilfe des „Prinzips der Aufgabenteilung“, aber auch zur sinnvollen Verknüpfung zwecks Ausnutzung unterstützender Hilfswirkungen, das „Prinzip der Selbsthilfe“ wertvolle Hinweise zur Gestaltung im Gesamten wie auch im Einzelnen geben.

Bei der Befolgung von Gestaltungsprinzipien ist es denkbar, dass sie gewissen Anforderungen widersprechen. So kann z. B. das Prinzip gleicher Gestaltfestigkeit als ein Prinzip der Kraftleitung der Forderung nach Minimierung der Fertigungskosten entgegenstehen. Auch kann das Prinzip der Selbsthilfe ein gewünschtes fail-safe-Verhalten des Systems ausschließen oder das aus Gründen der Herstellerleichterung gewählte Prinzip der gleichen Wanddicke (Leyer 1963–1978) den Forderungen nach Leichtbau oder gleich hoher Ausnutzung nicht genügen.

Die vorstehenden Beispiele zeigen auf, dass Gestaltungsprinzipien lediglich zu wählende Strategien darstellen, die nur unter bestimmten Voraussetzungen zweckmäßig sind. Der Konstrukteur und Entwickler muss je nach Problemlage unter den konkurrierenden Gesichtspunkten abwägen und sich dann für die am besten geeigneten Gestaltungsprinzipien entscheiden. Ohne ihre Kenntnis kann er aber eine zweckmäßige Entscheidung nicht treffen.

Nachfolgend werden aus der Sicht der Autoren wichtige Gestaltungsprinzipien vorgestellt, die sehr hilfreich sein können. Sie stammen vorwiegend aus der Betrachtung des Energieflusses, gelten aber auch im übertragenen Sinne für Stoff- und Signalflüsse.

## 12.1 Prinzip der Kraftleitung (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

### 1. Kraftfluss und Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit

Bei Aufgaben und Lösungen für den mechanischen Teil eines maschinenbaulichen oder elektrotechnischen Produkts handelt es sich fast immer um die Erzeugung von Kräften und/oder Bewegungen und deren Verknüpfung, Wandlung, Änderung und Leitung im Zusammenhang mit dem Stoff-, Energie- und Signalsatz.

Eine häufig wiederkehrende Teilfunktion ist dabei die Aufnahme und Leitung von Kräften. In einer Reihe von Veröffentlichungen wird auf eine kraftflussgerechte Gestaltung hingewiesen (Leyer 1963–1978; Thum 1944). Diese sucht Änderungen des Kraftflusses unter scharfen Umlenkungen und mit schroffen Querschnittsübergängen zu vermeiden. Leyer (1974, 1963–1978) hat die Gestaltung im Hinblick auf Kraftleitungsprobleme unter der Vorstellung Kraftfluss mit instruktiven Beispielen ausführlich und deutlich in seiner Gestaltungslehre dargelegt, so dass auf eine Wiederholung der angeführten Gesichtspunkte verzichtet wird. Der Konstrukteur möge sich diese wichtige Literatur zu eigen machen. Die Darstellungen Leyers zeigen aber auch die Komplexität im Zusammenwirken von Funktions-, Auslegungs- und Fertigungsgesichtspunkten. Der Komplex der Kraftleitung kann wie folgt zusammengefasst werden:

Der Begriff *Kraftleitung* soll im weiteren Sinne verstanden werden, also das Leiten von Biege- und Drehmomenten einschließen. Zunächst ist es aber gut, sich daran zu erinnern, dass

*die äußereren Lasten*, die am Bauteil angreifen,

Schnittgrößen –	Längs- und Querkräfte, Biege- und Drehmomente – bewirken, die im Bauteil
Beanspruchungen –	Normalspannungen als Zug- und Druckspannungen sowie Schubspannungen als Scher- und Torsionsspannungen – hervorrufen und ihrerseits stets
elastische oder plastische Verformungen –	als Verlängerungen, Verkürzungen, Querkontraktionen, Durchbiegungen, Schiebungen und Verdrehungen zur Folge haben.

Die aus den äußeren Lasten herrührenden Schnittgrößen werden gewonnen, indem die Bauteile an der betrachteten Stelle gedanklich aufgeschnitten werden (Bilden einer Schnittstelle). Die Schnittgrößen an den jeweiligen Schnittufern als Summe der Beanspruchungen müssen dann mit den äußeren Lasten dieses Ufers im Gleichgewicht stehen.

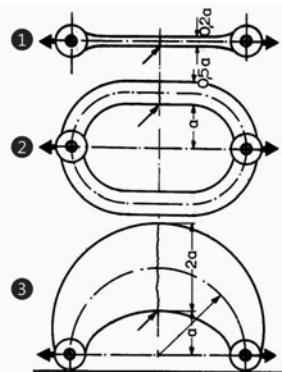
Die Beanspruchungen, ermittelt aus den Schnittgrößen, werden mit den Werkstoffgrenzwerten Zugfestigkeit, Fließgrenze, Dauer- und Betriebsfestigkeit, Zeitstandfestigkeit usw. unter Beachtung von Kerbwirkung, Oberflächen- und Größeneinfluss (Bauteilstabilität) nach Festigkeitshypothesen verglichen.

Das *Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit* (Thum 1944) strebt mittels geeigneter Wahl von Werkstoff und Form eine über die vorgesehene Betriebszeit überall gleich hohe Ausnutzung

**Abb. 12.1** Auswirkungen nicht kurzer und direkter Kraftleitungen  
(nach Ehlenspiel 2009)

Alle drei Übertragungsorgane haben die **gleiche Belastung** und **Beanspruchung** (rechteckiger Querschnitt gleicher Dicke)

- ① direkte Kraftleitung
- ② indirekte aber geschlossene Kraftleitung
- ③ indirekte Kraftleitung



der Bauteilfestigkeit an. Es ist, wie auch das Streben nach Leichtbau (Leyer 1974), dann anzuwenden, wenn wirtschaftliche Gesichtspunkte nicht entgegenstehen.

Eine kraftflussgerechte Gestaltung sucht daher scharfe „Kraftflussumlenkungen“ und eine Änderung der „Kraftflussdichte“ infolge schroffer Querschnittsübergänge zu vermeiden, damit keine ungleichmäßigen Beanspruchungsverteilungen mit hohen Spannungsspitzen auftreten.

Diese wichtige Festigkeitsbetrachtung, die der Konstrukteur sehr häufig vornimmt, verführt oft dazu, die die Beanspruchung begleitenden Verformungen zu vernachlässigen. Sie ihrerseits vermitteln aber vielfach erst das Verständnis für das Verhalten der Bauteile, also für ihr Bewähren oder Versagen.

## 2. Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung

In Übereinstimmung mit Leyer (1963–1978); Pahl (1973a) ist dieses Prinzip sehr bedeutsam:

Ist eine Kraft oder ein Moment von einer Stelle zu einer anderen bei möglichst *kleiner Verformung* zu leiten, dann ist der direkte und kürzeste Kraftleitungsweg der zweckmäßigste. Die direkte und kurze Kraftleitung belastet nur wenige Zonen. Die Kraftleitungswege, deren Querschnitte ausgelegt werden müssen, sind hinsichtlich

- Werkstoffaufwand (Volumen, Gewicht) und
- resultierender Verformung

zu minimieren.

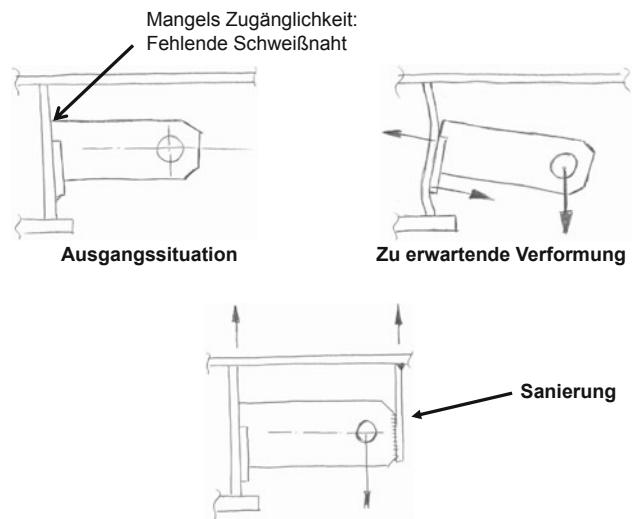
Abbildung 12.1 zeigt die Auswirkungen nicht direkter und kurzer Kraftleitung auf die Bauteilgröße (nach Ehlenspiel 2009).

Ein Beispiel aus der Praxis gibt Abb. 12.2 wieder. Hierbei handelt es sich um eine Bremsmomentstütze für die Radbremse eines Eisenbahngüterwagens. Auf der linken Seite der Abbildung ist der waagerechte Kragarm der Stütze zu erkennen. Er ist mit dem Hauptlängsträger des Fahrzeugs verbunden. Senkrecht von ihm, nach unten, geht die eigentliche Stütze ab, die mit dem Bremsenkörper verbunden ist. Über sie wird die Reaktionskraft der Bremse in den Kragarm eingeleitet.



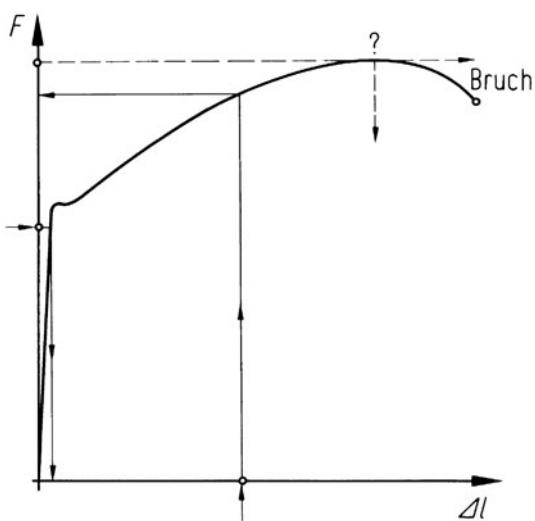
**Abb. 12.2** Bremsmomentstütze eines Güterwagens als Kragarm ausgeführt

**Abb. 12.3** Prinzipielle Verhältnisse an dem Kragarm



In Abb. 12.2 links sind die fehlenden Schweißnähte für den Kragarm durch einen Kreis gekennzeichnet. Wegen mangelhafter Zugänglichkeit sind sie nicht ausgeführt worden und haben wesentlich zum Bruch der Stütze beigetragen, wie er in der Abbildung rechts zu sehen ist. Abbildung 12.3 zeigt die prinzipiellen Verhältnisse an dem ausgeführten Kragarm und seine Sanierung.

**Abb. 12.4** Kraft-Verformungs-Diagramm zäher Werkstoffe. Die Pfeile deuten den Zusammenhang von Ursache und Wirkung an



Die Wahl der Mittel hängt als primär von der Art der Aufgabe ab. Dabei ist ausschlaggebend,

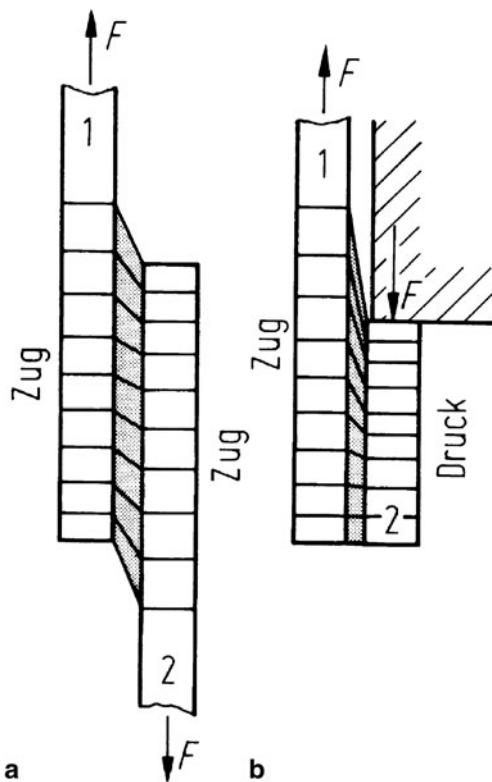
- ob es sich um eine Kraftleitung handelt, bei der die Haltbarkeit bei möglichst hoher Steifigkeit des Bauteils eine bestimmende Rolle spielt oder
- ob gewünschte Kraft-Verformungs-Zusammenhänge erfüllt werden müssen und die Haltbarkeit eine begleitende, aber zu beachtende Frage ist.

Wird die *Fließgrenze überschritten*, so ist gemäß Abb. 12.4 Folgendes zu beachten:

1. Wird ein *Bauteil durch eine Kraft* belastet, ist die sich einstellende Verformung eine zwangsläufige Folge. Wird dabei die Fließgrenze überschritten, ist die in der Rechnung vorausgesetzte Proportionalität zwischen Kraft und Verformung gestört: Schon bei relativ geringen Kraftänderungen in der Nähe des Gipfels der Kraft-Verformungs-Kurve können instabile Zustände auftreten, die zum Bruch führen, weil die tragenden Querschnitte sich stärker vermindern als es der Verfestigung des Werkstoffes bei plastischer Verformung entspricht. Beispiel: Zugstab, Zentrifugalkraft auf Scheibe, Gewichtslast am Seil. Entsprechende Sollsicherheit gegenüber der Fließgrenze ist nötig.
2. Wird ein *Bauteil verformt*, ist eine sich einstellende Reaktionskraft die Folge. Solange sich die aufgezwungene Verformung nicht ändert, ändern sich auch die Kraft und die Beanspruchung nicht. Verbleibt man vor dem Gipfel, ist ein stabiler Zustand vorhanden, der es gestattet, auch ohne Gefahr die Fließgrenze zu überschreiten. Oberhalb der Fließgrenze hat eine größere Änderung der Verformung nur eine relativ geringe Kraftänderung zur Folge. Es dürfen allerdings zu der so gewonnenen Vorspannlast keine weiteren gleichsinnigen Betriebslasten hinzukommen, da dann die Verhält-

**Abb. 12.5** Überlappte Kleb- oder Lötverbindung mit stark übertrieben dargestellten Verformungen nach Matting und Ulmer (1963).

- a Gleichgerichtete Verformung in Teil 1 und 2,
- b entgegengerichtete Verformung in Teil 1 und 2



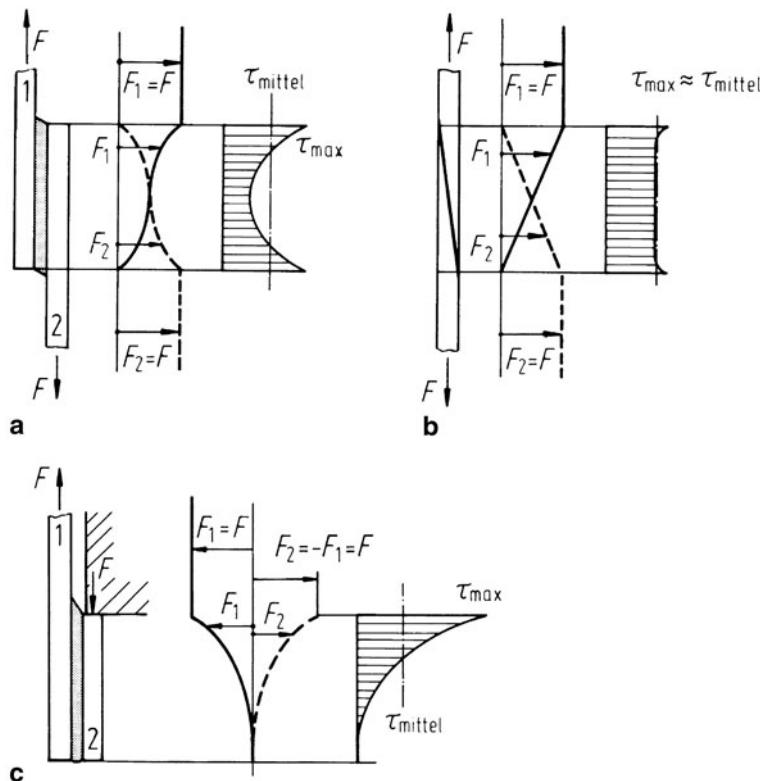
nisse wie unter 1. gelten. Eine weitere Voraussetzung ist die Verwendung zäher Werkstoffe und die Vermeidung gleichsinnig mehrachsiger Spannungszustände. Beispiele: hochverformter Querpressverband, vorgespannte Schraube ohne Betriebslast, Klemmverbindung.

### 3. Prinzip der abgestimmten Verformungen

Die oben im Punkt 1 entwickelte Kraftflussvorstellung ist zwar recht anschaulich, genügt aber oft nicht, die maßgeblichen Einflüsse erkennbar werden zu lassen. Neben der Festigkeitsfrage liegt der Schlüssel zum Verständnis im Verformungsverhalten der beteiligten Bauteile.

Nach dem *Prinzip der abgestimmten Verformungen* sind die beteiligten Komponenten so zu gestalten, dass unter Last eine weitgehende Anpassung mit Hilfe entsprechender, jeweils *gleichgerichteter Verformungen* bei möglichst *kleiner Relativverformung* entsteht.

Als Beispiel seien zunächst die Löt- und Klebverbindungen angeführt, bei denen die Löt- oder Klebschicht ein anderes Elastizitätsmodul hat als das zu verbindende Grundmaterial. Abbildung 12.5a zeigt den Verformungszustand, wie er in Matting und Ulmer (1963) dargestellt wurde. Die Verformungen und die Löt- bzw. Klebschicht sind der Anschaulichkeit



**Abb. 12.6** Kraft- und Spannungsverteilung in überlappter Kleb- oder Lötverbindung nach Magyar (o. J.). a Einschichtig überlappt (Biegebeanspruchung vernachlässigt), b geschäftet mit linear abnehmender Blechdicke, c starke „Kraftflussumlenkung“ mit entgegengerichteter Verformung (Biegebeanspruchung vernachlässigt)

halber stark übertrieben dargestellt. Unter der Last  $F$ , die an der Verbindungsstelle von Teil 1 an das Teil 2 weitergeleitet wird, entstehen zunächst unterschiedliche Verformungen in den einzelnen überlappten Teilen. Die verbindende Klebschicht wird besonders an den Randzonen infolge der von Teil 1 und 2 verursachten unterschiedlichen Relativverformung verzerrt, denn Teil 1 hat an dieser Stelle noch die volle Kraft  $F$  und ist daher gedehnt; Teil 2 hat noch keine Kraft übernommen, diese Zone ist nicht gedehnt. Die unterschiedliche Schiebung in der Klebschicht erzeugt eine wesentlich über die mittlere rechnerische Scherspannung hinausgehende, örtlich höhere Beanspruchung.

Ein besonders schlechtes Ergebnis mit sehr hohen Verformungsunterschieden ist bei der Anordnung Abb. 12.5b gegeben, weil infolge entgegengerichteter, nicht aufeinander abgestimmter Verformungen der Teile 1 und 2 die Schiebung in der Klebschicht stark vergrößert wird. Hieraus ist zu lernen, dass die Verformungen der beteiligten Teile gleichgerichtet und die Verformungsbeträge, wenn möglich, gleich sein sollen.

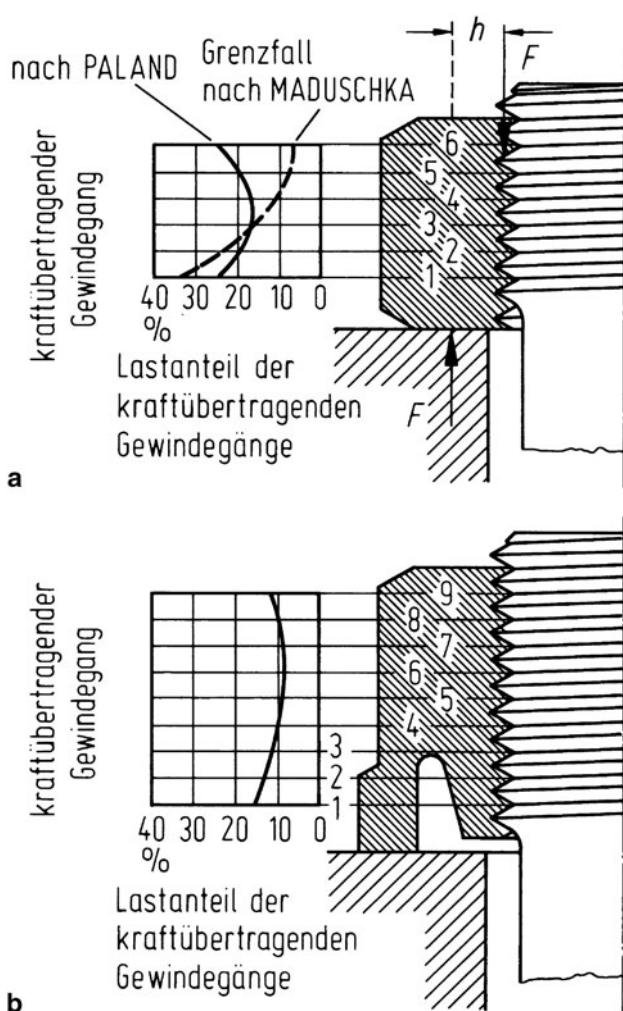
Magyar (o. J.) hat die Kraft- und Schubspannungsverhältnisse rechnerisch untersucht. Das Ergebnis ist in Abb. 12.6 qualitativ wiedergegeben.

**Abb. 12.7** Mutterformen und Beanspruchungsverteilung nach Wiegand et al. (1988).

a Druckmutter, Grenzfall nach Maduschka (1936), nach Paland (1960) mit Rücksicht auf Verformung unter Umstülpmoment  $F \cdot h$ ,

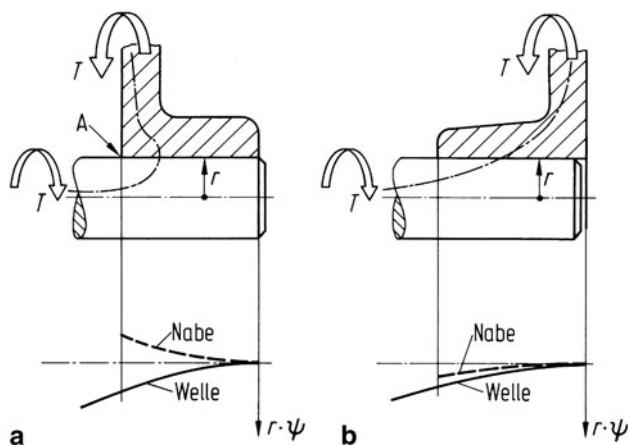
b kombinierte

Zug-Druck-Mutter mit gleichgerichteter Verformung im Zugteil



Bekannt ist diese Erscheinung auch bei Schraubenverbindungen unter Anwendung sog. Druck- und Zugmuttern (Wiegand et al. 1988). Die Druckmutter (s. Abb. 12.7a) wird gegenüber der zugbelasteten Schraube entgegengerichtet verformt. Bei Annäherung an eine Zugmutter (s. Abb. 12.7b) ergibt sich in den ersten Gewindegängen eine gleichgerichtete Verformung, die eine geringere Relativverformung und daher eine gleichmäßige Beanspruchungsverteilung bewirkt. Wiegand et al. (1988) hat dies mit dem Nachweis einer besseren Dauerhaltbarkeit bestätigen können. Nach Untersuchungen von Paland (1960) ist die Druckmutter allerdings nicht so ungünstig wie von Maduschka (1936) angegeben, weil das auf sie einwirkende Stülpmoment  $F \cdot h$  eine zusätzliche Verformung der Mutter an der Druckauflage nach außen erzwingt und so die ersten Gewindegänge entlastet. Eine solche entlastende Verformung der Mutter infolge des Stülpmoments sowie aber auch infolge

**Abb. 12.8** Welle-Nabe-Verbindung. **a** Mit starker „Kraftflussumlenkung“, hier entgegengerichteter Torsionsverformung bei A zwischen Welle und Nabe ( $\psi$  Verdrehwinkel), **b** mit allmählicher „Kraftflussumlenkung“; hier gleichgerichtete Torsionsverformung über der gesamten Nabellänge



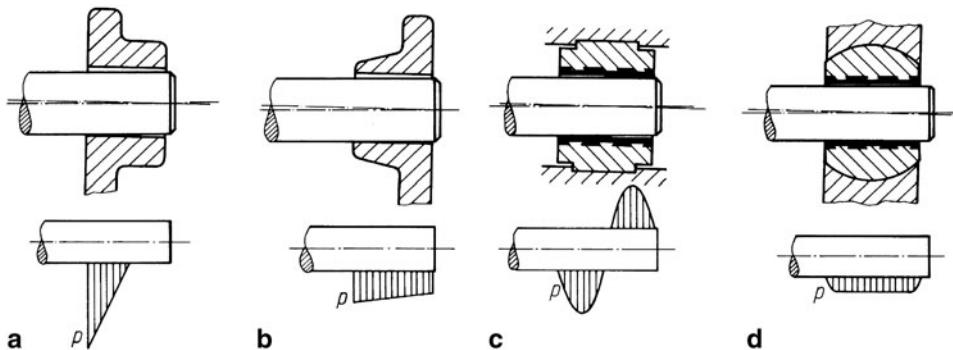
Biegung der Gewindezähne kann ebenso mit der Wahl eines geringeren Elastizitätsmoduls merklich verstärkt werden. Würden dagegen die entlastenden Verformungen mit Hilfe einer sehr steifen Mutter oder eines sehr kleinen Hebelarms  $h$  unterbunden, entsteht eine Lastverteilung ähnlich der, wie sie Maduschka angegeben hat.

Als weiteres Beispiel sei eine Welle-Nabe-Verbindung in Form eines Schrumpfsitzes angeführt. Im Wesentlichen ist dies wieder ein Verformungsproblem der beiden beteiligten Bauteile (bezüglich Biegemomentübertragung vgl. Häusler 1974). Beim Durchleiten des Torsionsmoments erleidet die Welle eine Torsionsverformung, die in dem Maße abgebaut wird, wie das Torsionsmoment an die Nabe übergeben wird. Die Nabe ihrerseits verformt sich entsprechend dem nun zunehmenden Torsionsmoment.

Nach Abb. 12.8a treffen die maximalen Verformungen mit entgegengesetzten Vorzeichen bei A aufeinander (entgegengerichtete Verformung) und bewirken damit eine merkliche Verschiebung der Oberflächen am Nabensitz gegeneinander. Bei Wechsel- oder Schwellmomenten kann dies zu einer Reibkorrosionsbildung führen, abgesehen davon, dass die Zonen am rechten Ende praktisch an einer Verformung nicht mehr teilnehmen und so auch nichts zur Drehmomentenübertragung beitragen.

Die Lösung in Abb. 12.8b ist hinsichtlich des Beanspruchungsverlaufs sehr viel günstiger, weil die resultierenden Verformungen gleichgerichtet sind. Die beste Lösung ergibt sich, wenn die Naberverdrehsteifigkeit so abgestimmt ist, dass sie der Torsionsverformung der Welle entspricht. Auf diese Weise müssen sich alle Zonen an der Kraftübertragung beteiligen, und man gewinnt eine gleichmäßige Kraftflussverteilung, die das geringste Beanspruchungsniveau ohne größere Beanspruchungsspitzen hat.

Auch wenn statt des Schrumpfsitzes eine Passfederverbindung vorgesehen wäre, würde die Anordnung nach Abb. 12.8a wegen der entgegengerichteten Torsionsverformung in der Nähe der Stelle A eine hohe Flächenpressungsspitze bewirken. Die Anordnung nach Abb. 12.8b hingegen kann wegen der gleichgerichteten Verformung eine gleichmäßige Pressungsverteilung sicherstellen (Militzer 1975).



**Abb. 12.9** Krafteinleitung bei Lagerstellen. **a** Kantenpressung infolge mangelnder Anpassung des Lagerauges an die verformte Welle, **b** gleichmäigere Lagerpressung infolge Abstimmung der Verformungen, **c** fehlende Einstellbarkeit auf Wellenverformung, **d** gleichmäigere Lagerpressung infolge Einstellbarkeit der Lagerbuchse

Angewandt wird das Prinzip der abgestimmten Verformung außerdem bei Lagerstellen, die so gestaltet werden, dass das Lager eine der Wellenverformung entsprechend abgestimmte Verformung oder Einstellung ermöglicht, s. Abb. 12.9.

Das Prinzip der abgestimmten Verformungen ist nicht nur bei der Leitung von Kräften von einem Bauteil an das andere zu beachten, sondern auch bei der Verzweigung oder Sammlung von Kräften bzw. Momenten. Bekannt ist das Problem des gleichzeitigen Antriebs von Rädern, die in großem Abstand angeordnet werden müssen, z. B. bei Kranlaufwerken. Die in Abb. 12.10a gezeigte Anordnung hat links wegen des kurzen Kraftleitungswegs eine relativ hohe, der rechte Teil eine im Verhältnis der Längen  $l_1/l_2$  niedrigere Torsionssteifigkeit. Beim Aufbringen des Drehmoments wird sich daher das linke Rad zuerst in Bewegung setzen, während das rechte noch stillsteht, weil erst die Abrollbewegung links die nötige Torsionsverformung rechts zur Momentenübertragung ermöglicht. Das Laufwerk erhält stets eine Schieflauftendenz.

Wesentlich ist, für beide Wellenteile die gleiche Torsionssteifigkeit vorzusehen, die eine entsprechende Aufteilung des Anfahrdrehmoments bewirkt. Sie kann auf zwei verschiedene Weisen erzielt werden, wenn man bei nur einer Drehmomenteinleitungsstelle bleibt, nämlich durch

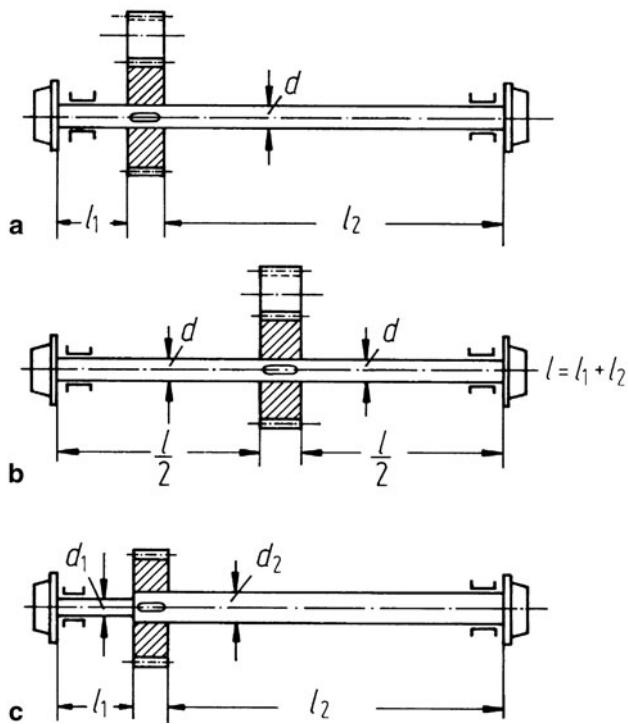
- symmetrische Anordnung (s. Abb. 12.10b) oder
- Anpassen der Verdrehsteifigkeit der entsprechenden Wellenteile (s. Abb. 12.10c).

#### 4. Prinzip des Kraftausgleichs

Diejenigen Kräfte und Momente, die der direkten Funktionserfüllung dienen, wie Antriebsmoment, Umfangskraft, aufzunehmende Last usw., können entsprechend der Definition der Hauptfunktion als *funktionsbedingte Hauptgrößen* angesehen werden.

**Abb. 12.10** Anwendung des Prinzips der abgestimmten Verformung, hier gleicher Verformungen, beim Antrieb von Kranlaufwerken.

- a Ungleiche Torsionsverformung der Längen  $l_1$  und  $l_2$ ,
- b symmetrische Anordnung sichert gleiche Torsionsverformung,
- c asymmetrische Anordnung, aber mit gleicher Torsionsverformung mittels Anpassung der Wellendurchmesser zu einer gleichen Verdrehsteifigkeit

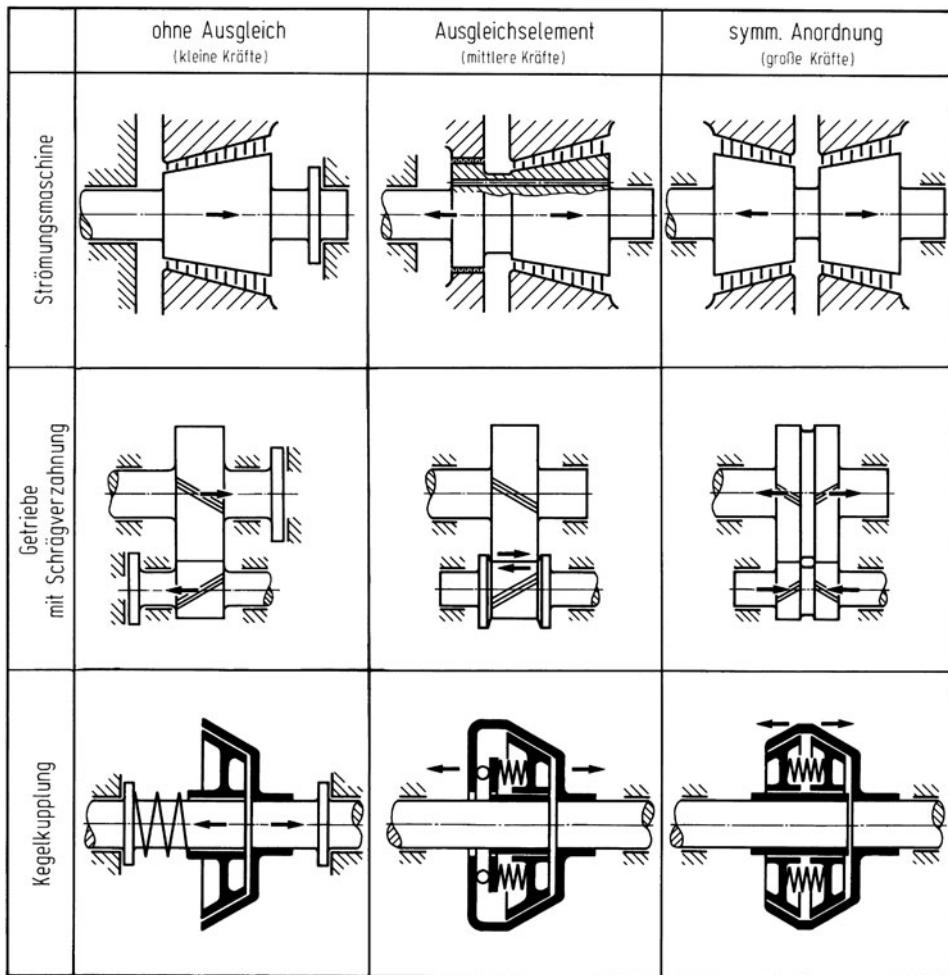


Daneben entstehen aber sehr oft Kräfte und Momente, die nicht zur direkten Funktionserfüllung beitragen, sich aber nicht vermeiden lassen, z. B.

- der Axialschub einer Schrägverzahnung,
- die resultierenden Kräfte aus einer Druck  $\times$  Flächen-Differenz, z. B. an der Beschaufelung einer Strömungsmaschine oder an Stell- und Absperrorganen,
- Spannkräfte zur Erzeugung einer reibschlüssigen Verbindung,
- Massenkräfte bei einer hin- und hergehenden oder rotierenden Bewegung und
- Strömungskräfte, sofern sie nicht Hauptgrößen sind.

Solche Kräfte oder Momente begleiten die Hauptgrößen und sind ihnen fest zugeordnet. Sie werden als *begleitende Nebengrößen* bezeichnet und können entsprechend der Definition der Nebenfunktion unterstützend wirken oder aber nur zwangsläufig begleitend auftreten.

Die Nebengrößen belasten die Kraftleitungszonen der Bauteile zusätzlich und erfordern entsprechende Auslegung oder weitere aufnehmende Wirkflächen und Elemente, wie Absteifungen, Bunde, Lager usw. Dabei werden Gewichte und Massen größer, und oft entstehen noch zusätzliche Reibungsverluste. Daher sollen die Nebengrößen möglichst an ihrem Entstehungsort ausgeglichen werden, damit ihre Weiterleitung nicht eine schwerere Bauart oder verstärkte Lager und Aufnahmeelemente nötig machen.



**Abb. 12.11** Grundsätzliche Lösungen für Kraftausgleich am Beispiel einer Strömungsmaschine, eines Getriebes und einer Kupplung

Wie schon in Pahl (1967) ausgeführt, kommen für einen solchen Kraftausgleich im Wesentlichen zwei Lösungsarten in Betracht:

- Ausgleichselemente oder
- symmetrische Anordnung.

In Abb. 12.11 ist schematisch dargestellt, wie an einer Strömungsmaschine, einem schrägverzahnten Getriebe und einer Kupplung die Kräfte solcher Nebengrößen grundsätzlich ausgeglichen werden können. Dabei ist das Prinzip der kurzen und direkten Kraftleitung, die möglichst wenige Kraftleitungszonen erfasst, beachtet worden. Auf diese Weise werden

keine Lagerstellen zusätzlich belastet und der Bauaufwand wird insgesamt so gering wie möglich gehalten.

Bezüglich des Ausgleichs von Massenkräften ist die rotationssymmetrische Anordnung von Natur aus in sich ausgeglichen. Bei hin- und hergehenden Massen wendet man dieselben prinzipiellen Lösungsarten an, wie Beispiele aus dem Motorenbau zeigen, wenn eine geringe Zylinderzahl einen Ausgleich untereinander nur unvollkommen ermöglicht. Verwendet werden Ausgleichselemente bzw. -gewichte oder -wellen (Rixmann 1962) sowie symmetrische Zylinderanordnungen, z. B. Boxermotor.

In der Regel, die aber von übergeordneten Gesichtspunkten durchbrochen werden kann, wird man das Ausgleichselement bei relativ mittleren, die symmetrische Anordnung bei relativ großen auszugleichenden Kräften vorziehen.

## 5. Praxis der Kraftleitung

Bei der Leitung von Kräften hilft zur Gestaltung der Bauteile und Baustrukturen das physikalisch nicht definierbare, aber anschauliche Vorstellungsbild des *Kraftflusses*. Der Kraftfluss muss folgende Kriterien erfüllen:

- Der Kraftfluss muss stets geschlossen sein,
- der Kraftfluss sollte möglichst kurz sein, was optimal durch direkte Kraftleitung erreicht wird, und
- scharfe Umlenkungen des Kraftflusses und Änderungen der Kraftflussdichte infolge schroffer Querschnittsänderungen sind zu vermeiden.

Bei komplexen Kraftleitungssituationen ist die Definition bzw. Darstellung einer Kraftfluss-Hüllfläche (Wirkzone der Kräfte) zweckmäßig, außerhalb der keine Kräfte mehr auftreten. Je kleiner diese Hüllfläche, desto kürzer ist auch der Kraftfluss.

*Das Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit* strebt mittels geeigneter Wahl von Werkstoff und Form eine über die vorgesehene Betriebszeit überall gleich hohe Ausnutzung der Festigkeit an.

*Das Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung* bewirkt ein Minimum an Werkstoffaufwand, Volumen, Gewicht und Verformung und ist besonders dann anzuwenden, wenn ein steifes Bauteil erwünscht ist.

*Das Prinzip der abgestimmten Verformungen* beachtet die von der Beanspruchung hervorgerufenen Verformungen, sucht Anordnungen mit einem gegenseitig abgestimmten Verformungsmechanismus, damit Beanspruchungserhöhungen vermieden werden und die Funktion zuverlässig erfüllt wird.

*Das Prinzip des Kraftausgleichs* sucht mit Ausgleichselementen oder mit Hilfe einer symmetrischen Anordnung die die Hauptgrößen begleitenden Nebengrößen auf kleinstmögliche

Zonen zu beschränken, damit Bauaufwand und Verluste so gering wie möglich bleiben. In vielen Situationen können diese Prinzipien oft nur angenähert oder als Kombination angewendet werden.

---

## 12.2 Prinzip der Aufgabenteilung (**Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote**)

### 1. Zuordnung der Teifunktionen

Schon beim Aufstellen der Funktionsstruktur und deren Variation stellt sich die Frage, inwieweit mehrere Funktionen durch nur eine ersetzt werden können oder ob eine Funktion in mehrere weitere Teifunktionen aufgeteilt werden muss.

Diese Fragen ergeben sich in analoger Form auch jetzt, wenn es gilt, die erforderlichen Funktionen mit der zweckmäßigen Wahl und Zuordnung von Funktionsträgern zu erfüllen:

- Welche Teifunktionen können gemeinsam mit nur einem Funktionsträger erfüllt werden?
- Welche Teifunktionen müssen mit mehreren, voneinander abgegrenzten Funktionsträgern realisiert werden?

Hinsichtlich der Zahl der Komponenten und des Raum- und Gewichtsbedarfs wäre nur ein Funktionsträger anzustreben, der mehrere Funktionen umfasst. Bezüglich des Fertigungs- und Montagevorgangs kann aber wegen der möglichen Kompliziertheit eines solchen Bauteils bereits dieser Vorteil in Frage gestellt sein. Dennoch wird man aus wirtschaftlichen Gründen zunächst danach trachten, mehr als eine Funktion mit einem Funktionsträger zu verwirklichen.

Eine Reihe von Baugruppen und Einzelteilen übernehmen mehrere Funktionen gleichzeitig oder nacheinander:

So dient die Welle, auf die ein Zahnrad aufgesetzt ist, gleichzeitig zur Leitung des Torsionsmoments und der Drehbewegung sowie zur Aufnahme der aus der Zahnnormalkraft entstehenden Biegemomente und Querkräfte. Weiterhin übernimmt sie die axialen Führungskräfte, bei Schrägverzahnung zusätzlich die Axialkraftkomponente aus der Verzahnung, und sorgt zusammen mit dem Radkörper für genügende Formsteifigkeit, damit ein gleichmäßiger Zahneingriff über der Radbreite gewährleistet ist.

Eine Rohrflanschverbindung ermöglicht Verbindung und Trennung von Rohrleitungsstücken, stellt die Dichtigkeit der Trennstelle her und leitet alle Rohrkräfte und -momente weiter, die entweder aus der Rohrvorspannung oder aus Folgeerscheinungen des Betriebs durch Wärmedehnung oder durch nicht ausgeglichene Rohrkräfte entstehen.

Ein Turbinengehäuse normaler Bauart bildet den strömungsrichtigen Zu- und Abfluss für das energietragende Medium, bietet die Halterung für die Leitschaufeln, leitet die

Reaktionskräfte an das Fundament bzw. die Auflage und sichert den dichten Abschluss nach außen.

Eine Druckbehälterwand in einer Chemieanlage muss ohne Beeinflussung des chemischen Prozesses eine Haltbarkeits- und Dichtungsaufgabe bei gleichzeitiger Korrosionsabwehr über lange Zeit erfüllen.

Ein Rillenkugellager vermag neben der Zentrieraufgabe sowohl Radial- als auch Axialkräfte bei relativ geringem Bauvolumen zu übertragen und ist in dieser Eigenschaft ein beliebtes Maschinenelement.

Die Vereinigung mehrerer Funktionen auf nur einen Funktionsträger stellt oft eine recht wirtschaftliche Lösung dar, solange dadurch keine schwerwiegenden Nachteile entstehen. Solche Nachteile ergeben sich aber meist dann, wenn

- die Leistungsfähigkeit des Funktionsträgers bis zur Grenzleistung bezüglich einer oder mehrerer Funktionen gesteigert werden muss und
- das Verhalten des Funktionsträgers bezüglich einer wichtigen Bedingung unbedingt eindeutig und unbeeinflusst bleiben muss.

In der Regel ist es bei der Übernahme mehrerer Funktionen dann nicht mehr möglich, den Funktionsträger hinsichtlich der zufordernden Grenzleistung oder hinsichtlich seines eindeutigen Verhaltens optimal zu gestalten. In diesen Fällen macht man vom Prinzip der Aufgabenteilung Gebrauch (Pahl 1973b). Nach dem Prinzip der Aufgabenteilung wird jeder Funktion ein besonderer Funktionsträger zugeordnet. Die Aufteilung einer Funktion auf mehrere Funktionsträger kann in Grenzfällen zweckmäßig sein.

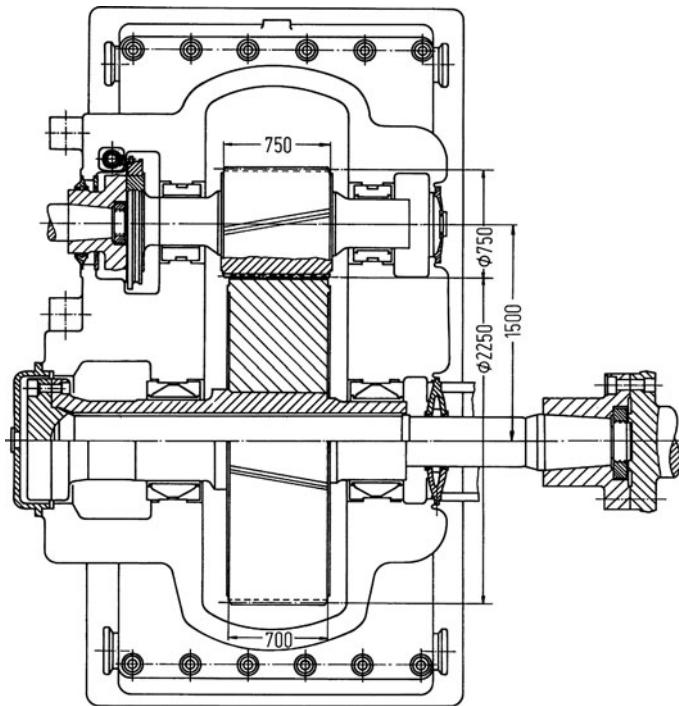
### *Das Prinzip der Aufgabenteilung*

- gestattet eine weitaus bessere Ausnutzung des betreffenden Bauteils,
- erlaubt eine höhere Leistungsfähigkeit und
- sichert ein eindeutiges Verhalten und unterstützt dadurch die Grundregel „eindeutig“,

weil mit der Trennung der einzelnen Aufgaben eine für jede Teifunktion angepasste optimale Gestaltung und eindeutigere Berechnung möglich sind. Im Allgemeinen wird der bauliche Aufwand allerdings größer.

Um zu prüfen, ob das Prinzip der Aufgabenteilung sinnvoll angewandt werden kann, analysiert man die *Funktionen* und prüft nach, ob bei der gleichzeitigen Erfüllung mehrerer Funktionen

- Einschränkungen oder
- gegenseitige Behinderungen bzw. Störungen entstehen.



**Abb. 12.12** Großes Leistungsgetriebe mit Torsionswelle im Abtrieb: Lagerkräfte gehen über steife Hohlwelle, Torsionswelle radial nachgiebig und torsionsweich (nach Pahl 1972) (Bauart Siemens-Maag)

Ergibt die Funktionsanalyse eine solche Situation, ist eine Aufgabenteilung auf eigens abgestimmte Funktionsträger, die jeweils nur die spezielle Funktion erfüllen, zweckmäßig.

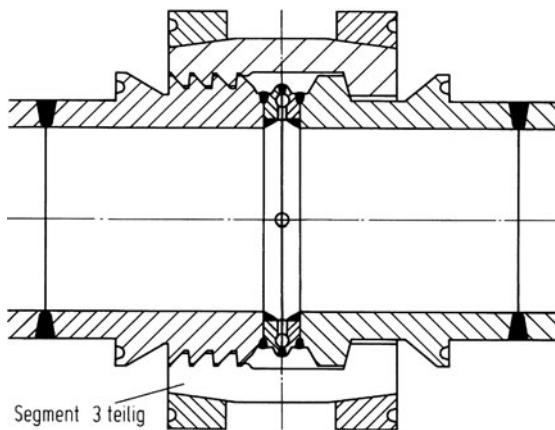
## 2. Aufgabenteilung bei unterschiedlichen Funktionen

Beispiele aus verschiedenen Gebieten zeigen, wie vom Prinzip der Aufgabenteilung bei unterschiedlichen Funktionen vorteilhaft Gebrauch gemacht werden kann.

Bei großen Getrieben als Vermittler zwischen Turbine und Generator bzw. Kompressor besteht der Wunsch, an der Abtriebsseite des Getriebes aus Gründen der Wärmedehnung des Fundaments und der Lager sowie wegen der torsionsschwingungsmäßigen Eigenschaften eine radialnachgiebige und torsionsweiche Welle bei möglichst kurzer axialer Länge zu haben (Pahl 1972). Die Getrieberadwelle muss aber wegen der Zahneingriffsverhältnisse möglichst starr sein. Hier hilft das Prinzip der Aufgabenteilung, indem das Getrieberad auf einer steifen Hohlwelle mit möglichst kurzem Lagerabstand angeordnet und der radial- und torsionsnachgiebige Wellenteil als innere Torsionswelle ausgebildet wird, s. Abb. 12.12.

Die Klammerverbindung einer Heißdampfleitung (s. Abb. 12.13) ist ebenfalls nach dem Prinzip der Aufgabenteilung aufgebaut. Kraftleiten und Abdichten werden von verschiedenen Funktionsträgern übernommen: Die Dichtfunktion übernimmt die Schweiß-

**Abb. 12.13** Klammerverbindung in einer Heißdampfleitung (Bauart Zikesch)

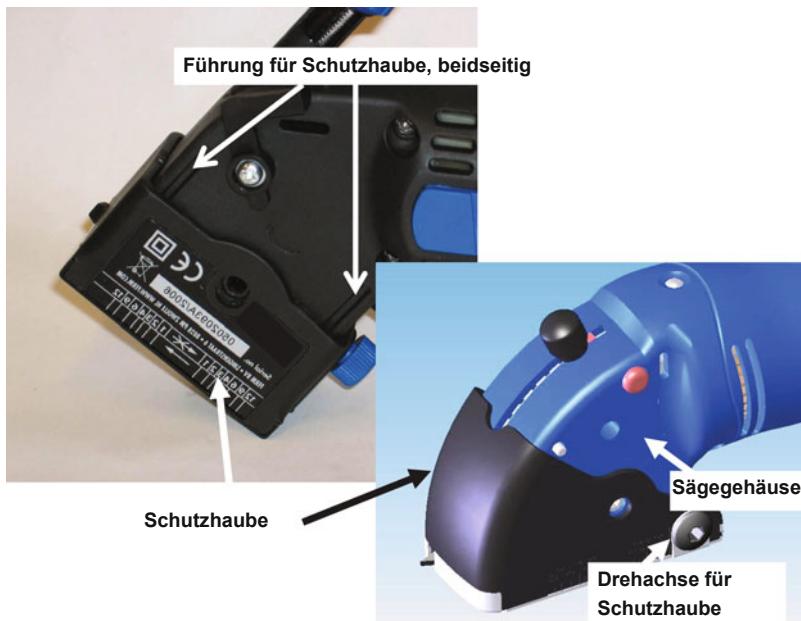


membrandichtung, gleichzeitig wird über den Stützteil der Schweißmembrandichtung eine Druckkraft aus der Verspannung durch die Klammer geleitet. Zugkräfte oder Biegemomente vermag die Dichtung kaum aufzunehmen, ihre Funktion und Haltbarkeit wären gestört. Alle Rohrleitungskräfte und -momente werden von der Klammerverbindung übernommen, die wiederum nach dem Prinzip der Aufgabenteilung gestaltet ist. Mittels Formschluss gibt die aus Segmenten gebildete Klammer Kräfte und Biegemomente weiter. Die Schrumpfringe halten ihrerseits die Klammersegmente reibschlüssig auf einfache und zweckmäßige Weise zusammen. Jedes Teil lässt sich seiner Aufgabe gemäß optimal gestalten und ist für sich gut berechenbar.

In Abb. 12.14 sind die unterschiedlich ausgeführten Schutzhauben für zwei Minikreissägen wiedergegeben. Die Schutzhaube muss gegenüber dem Sägegehäuse relativ exakt geführt werden, um ein Klemmen, z. B. durch Verkanten, zu verhindern. Zusätzlich kann Sägestaub die Bewegung der Schutzhaube noch behindern. Bei der Ausführung auf der linken Seite der Abb. 12.14 handelt es sich um eine Integralkonstruktion. Die Führungen der Schutzhaube sind zum einen als vier Nuten in das Sägegehäuse geprägt, siehe Pfeile, und zum anderen als Stege im Inneren der Schutzhaube ausgeführt. Hier ist also die Funktion „Schützen und Führen“ in einem Funktionsträger integriert. Nachteilig bei dieser Konstruktion ist die Mehrfachpassung durch die Anordnung der Führungen. Dies führt in der Praxis zum Verklemmen der Haube, insbesondere, wenn sich vom Sägvorgang noch Feinstaub in den Führungen absetzt.

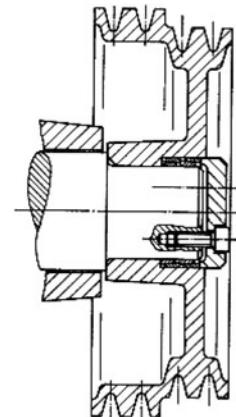
Auf der rechten Seite der Abb. 12.14 ist die Führung der Schutzhaube nach dem Prinzip der Aufgabenteilung gestaltet. Es liegt eine eindeutige Trennung zwischen der Funktion „Anwender schützen“ und „Schutzhaube führen“ vor. Die Drehführung hat gleichzeitig noch den Vorteil, dass sie einfacher abzudichten ist.

Eine Aufgabenteilung ist z. B. auch auf Abb. 12.15 zu erkennen: Die Ringfeder-Spannelemente übertragen das Drehmoment, und die daneben angeordnete Zylinderfläche stellt den zentralen und taumelfreien Sitz der Riemscheibe sicher, was das Spannlement allein, wenigstens bei höheren Genauigkeitsansprüchen, nicht zu bieten vermag.



**Abb. 12.14** Integralkonstruktion und Konstruktion nach dem Prinzip der Aufgabenteilung für Schutzhäuben

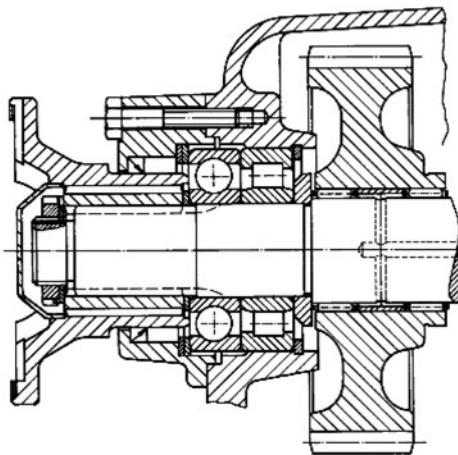
**Abb. 12.15** Ringfeder-Spannelemente mit gesonderter Zentrierung



Ein weiteres Beispiel findet man in Wälzlagern, bei denen zur Erhöhung der Lebensdauer des Festlagers die Aufnahme von Radial- und Axialkräften sehr klar getrennt wird, s. Abb. 12.16. Das Rillenkugellager ist am Außenring radial nicht geführt und dient so bei kleinem Raumbedarf ausschließlich zur Aufnahme von Axialkräften, das Rollenlager übernimmt dagegen nur die Radialkräfte.

Konsequent ist weiterhin das Prinzip der Aufgabenteilung bei den Mehrschicht-Flachriemen verfolgt. Sie bestehen einerseits aus einem Kunststoffband, das in der Lage

**Abb. 12.16** Festlager mit Trennung der Radial- und Axialkraftübernahme



ist, die hohen Zugkräfte zu übertragen, andererseits ist die Laufseite dieses Bandes mit einer Chromlederschicht versehen, die für einen hohen Reibwert zur Leistungsübertragung sorgt.

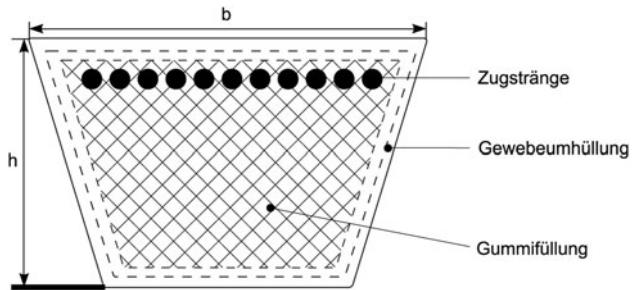
### 3. Aufgabenteilung bei gleicher Funktion

Wird infolge Leistungs- oder Größensteigerung eine Grenze erreicht, kann sie durch Aufteilen der gleichen Funktion auf mehrere gleiche Funktionsträger überwunden werden. Im Prinzip handelt es sich um eine *Leistungsverzweigung* und eine anschließende Sammlung. Hierfür können ebenfalls viele Beispiele angeführt werden:

Die Übertragungsfähigkeit eines Keilriemens, der selbst nach dem Prinzip der Aufgabenteilung aufgebaut ist, kann nicht durch eine Querschnittsvergrößerung (Zahl der übertragenden Zugstränge pro Riemen) beliebig gesteigert werden, weil bei gleichem Scheibendurchmesser eine steigende Riemenhöhe  $h$  (s. Abb. 12.17) die Biegebeanspruchung steigen lässt. Die damit verbundene Verformungsarbeit wächst, und das wärmeflusshemmende, mit Hystereseigenschaften behaftete Gummifüllmaterial erfährt eine zu große Erwärmung, was die Lebensdauer verringern würde. Eine überproportionale Breite des Riemens dagegen würde seine notwendige Quersteifigkeit zur Aufnahme der an den Keilflächen wirkenden Normalkräfte unzulässig herabsetzen. Die Leistungssteigerung ergibt sich, wenn die Gesamtleistung in entsprechende Teilleistungen aufgeteilt wird, die jeweils die Grenzleistung des Einzelriemens unter Berücksichtigung seiner Lebensdauer darstellen (Mehrfachanordnungen paralleler Keilriemen).

Zahnradgetriebe, insbesondere Planetengetriebe, machen durch Mehrfacheingriff vom Prinzip der Aufgabenteilung, hier Leistungsteilung, Gebrauch. Da das Ritzel ohnehin dauerfest ausgelegt ist, kann, solange die Erwärmung in beherrschbaren Grenzen bleibt, mit Mehrfacheingriff die übertragbare Leistung gesteigert werden. Bei der rotationssymmetrischen Anordnung von Planetengetrieben nach Kraftausgleichsprinzipien entfällt sogar

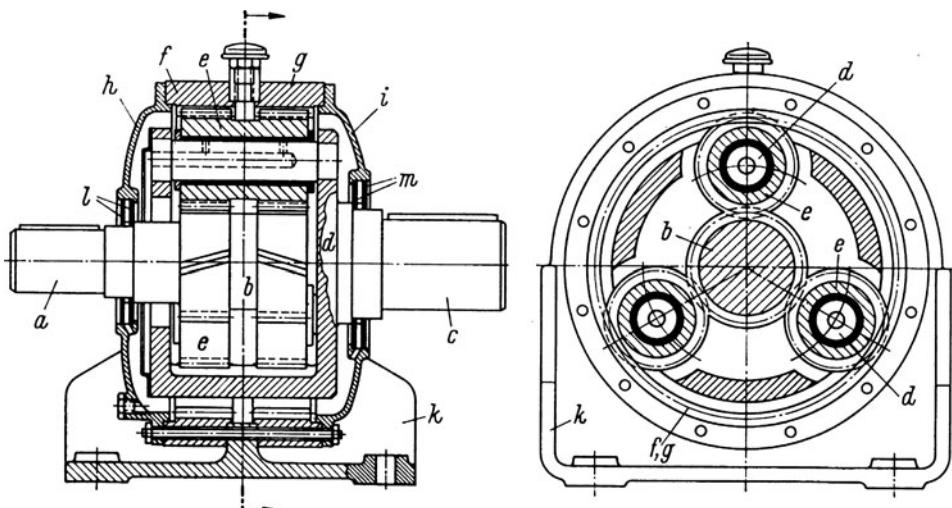
**Abb. 12.17** Querschnitt durch einen Keilriemen



die Wellenbiegung infolge der Zahnnormalkräfte, allerdings wird die Torsionsverformung wegen des größeren Leistungsflusses stärker, s. Abb. 12.18. In großen Leistungsgtrieben macht man von diesem Prinzip in den sog. Mehrweggetrieben, die dann nur mit den genauer herstellbaren außenverzahnten Stirnrädern ausgerüstet sind, vorteilhaft Gebrauch. Wie in Ehrlenspiel (1969) dargestellt, ist eine der Anzahl der Leistungsflüsse entsprechende Leistungssteigerung möglich. Allerdings kann sie nicht ganz proportional steigen, weil in den einzelnen Stufen eine andere Flankengeometrie mit etwas höherer Flankenbeanspruchung entsteht. Grundsätzliche Anordnungen zeigt Abb. 12.19.

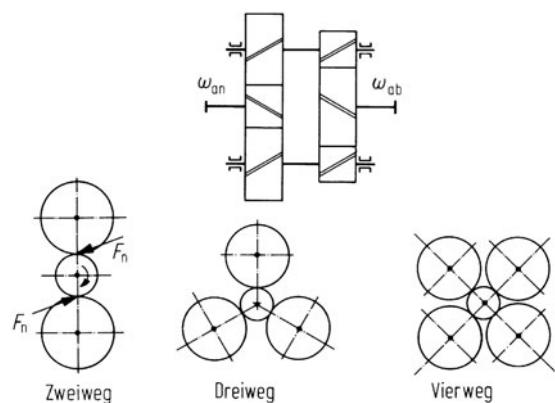
Problematisch bleibt beim Prinzip der Aufgabenteilung mit gleicher Funktion die gleichmäßige Heranziehung aller Teilelemente zur vollen Funktionserfüllung, d. h. die Sicherstellung einer *gleichmäßigen Kraft- bzw. Leistungsverteilung*. Sie kann im Allgemeinen nur erreicht werden, wenn die beteiligten Elemente

- sich entweder auf die Kraftwirkung im Sinne eines Kraftausgleichs selbsttätig einstellen können oder



**Abb. 12.18** Planetengetriebe mit Leistungsverzweigung und frei einstellbarem Ritzel (nach Ehrlenspiel 1967)

**Abb. 12.19** Grundsätzlicher Aufbau von Mehrweggetrieben  
(nach Pahl 1972)



- eine flache Kennlinie zwischen maßgebender Größe (Kraft, Moment usw.) und ausgleichender Eigenschaft (Federweg, Nachgiebigkeit usw.) haben.

Im Fall des Keilriemenantriebs muss der Umfangskraft eine hinreichend große Riemendehnung gegenüberstehen, die Toleranzabweichungen in der Riemenlänge und unterschiedliche Wirkdurchmesser infolge von Abmessungstoleranzen am Riemen und in der Scheibenrinne oder von Parallelitätsfehlern der Wellen mit nur sehr geringer Kraftänderung ausgleicht.

Beim Beispiel der Rohrleitung müssen die einzelnen Rohrwiderstände, Zu- und Abströmverhältnisse sowie auch die Geometrie der Rohranordnung möglichst gleich und die einzelnen Verlustbeiwerte klein sowie von der Strömungsgeschwindigkeit wenig beeinflussbar sein.

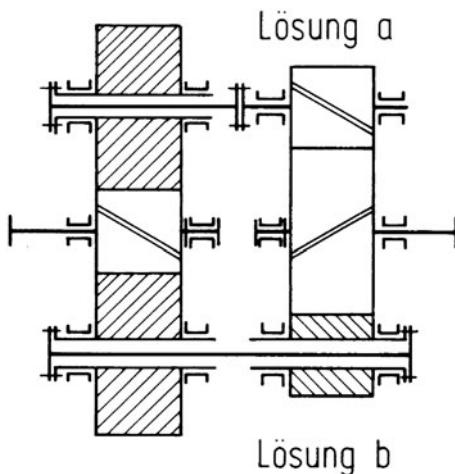
Bezüglich der Mehrweggetriebe muss eine streng symmetrische Anordnung für gleiche Steifigkeiten und Temperaturverteilungen über dem Umfang sorgen. Mittels gelenkiger oder sehr nachgiebiger Anordnungen oder Einstellelementen (Ehrlenspiel 1967) ist das gleichmäßige Teilnehmen aller Komponenten an der Kraftleitung zu sichern.

Abbildung 12.20 gibt ein Beispiel für eine nachgiebige Anordnung. Weitere Ausgleichsmittel, wie elastische und gelenkige Glieder, sind in Ehrlenspiel (1967) zu finden.

Insgesamt bietet das Prinzip der Aufgabenteilung eine Steigerung der Grenzleistung oder der Anwendungsbereiche. Bei Aufteilung auf verschiedene Funktionsträger gewinnt man eindeutige Verhältnisse hinsichtlich Wirkung und Beanspruchung. Bei der Aufteilung einer gleichen Funktion auf mehrere, aber gleiche Funktionsträger kann man ebenfalls spezifische Grenzen hinausschieben, wenn man mit entsprechend einstellbaren oder sich selbst anpassenden Elementen für einen allseits gleichen Leistungs- bzw. Kraftfluss sorgt.

Bei Tragstrukturen (wie Abstützungen und Lagerungen) mit Verzweigung der Kraftleitung kann eine gleichmäßigere Lastverteilung durch Anpassung des Steifigkeitsverhaltens erreicht werden. Bei der Steifigkeitsanalyse sind Ort und Richtung des äußeren Kraftan-

**Abb. 12.20** Lastausgleich bei Mehrweggetrieben mittels elastischer Torsionswelle (nach Pahl 1972)



griffs zu beachten, da sie das Verformungsverhalten beeinflussen. Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente ist die Beurteilung relativ leicht durchführbar.

Im Allgemeinen steigt der bauliche Aufwand, was eine insgesamt höhere Wirtschaftlichkeit oder Sicherheit ausgleichen muss.

## 12.3 Prinzip der Selbsthilfe (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

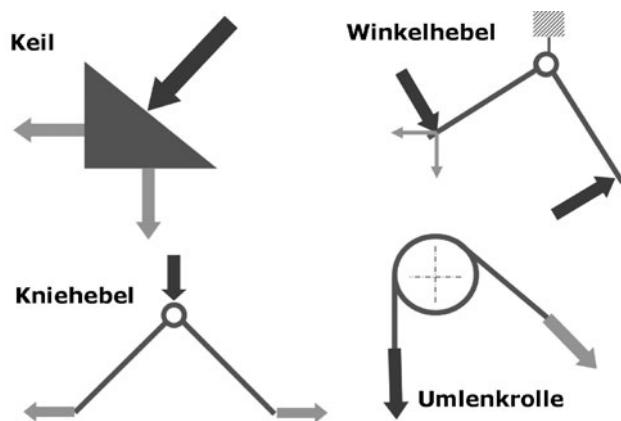
### 1. Begriffe und Definitionen

Im vorhergehenden Abschnitt wurde das Prinzip der Aufgabenteilung besprochen, bei dessen Anwendung eine größere Grenzleistung und ein eindeutigeres Verhalten der Bauteile ermöglicht werden. Dies wurde nach einer Analyse der Teilfunktionen mit getrennter Zuordnung entsprechender Funktionsträger erreicht, die sich in ihrer Wirkungsweise nicht gegenseitig beeinflussen oder stören.

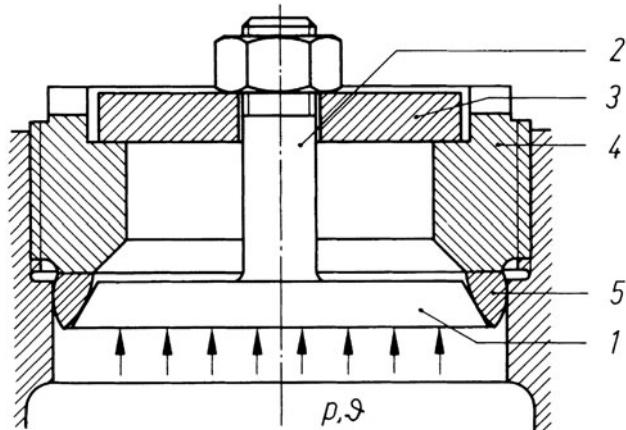
Nach einer analytischen Betrachtung der Teilfunktionen und ihrer in Betracht kommenden Funktionsträger kann nach dem *Prinzip der Selbsthilfe* durch geschickte Wahl der Systemelemente und ihrer Anordnung im System selbst eine sich gegenseitig unterstützende Wirkung erzielt werden, die hilft, die Funktion besser zu erfüllen.

Der Begriff der *Selbsthilfe* umfasst in einer *Normalsituation* (Normallast) die Bedeutung von gleichsinnig Mitwirken aber auch Entlasten und Ausgleichen, in einer *Notsituation* (Überlast) die Bedeutung von Schützen oder Retten. Bei einer selbsthilfenden Konstruktion entsteht die erforderliche *Gesamtwirkung* aus einer *Ursprungswirkung* und einer *Hilfswirkung*.

**Abb. 12.21** Beispiele von Gestaltelementen zur Kraftteilung und -umlenkung



**Abb. 12.22** Selbstdichtender Deckelverschluss. 1 Deckel, 2 zentrale Schraube, 3 Traverse, 4 Gewindestück mit Sägezahngewinde, 5 Metall-Dichtring;  $p$  Innendruck,  $\vartheta$  Temperatur



Die *Ursprungswirkung* leitet den Vorgang ein, stellt die notwendige Anfangssituation sicher und entspricht in vielen Fällen bezüglich der Wirkung der herkömmlichen Lösung ohne Hilfswirkung, jedoch mit entsprechend kleinerer Wirkungshöhe.

Die *Hilfswirkung* wird aus funktionsbedingten Hauptgrößen (Umfangskraft, Drehmoment usw.) und/oder aus deren begleitenden Nebengrößen (Axialkraft aus Schrägverzahnung, Zentrifugalkraft, Kraft aus Wärmedehnung usw.) gewonnen, sofern eine fest definierte Zuordnung zwischen ihnen gegeben ist. Eine Hilfswirkung kann aber auch mit Hilfe einer anderen Kraftflussverteilung und damit geänderten, aber tragfähigeren Beanspruchungsart oder -verteilung gewonnen werden.

In mechanischen Systemen wird die Hilfswirkung durch Gestaltelemente zur Kraftteilung oder Kraftumlenkung gewonnen, wie sie in Abb. 12.21 wiedergegeben sind.

Die Anregung, das Prinzip der Selbsthilfe zu formulieren, geht auf den sog. Bredtschneider-Uhde-Verschluss zurück, der einen selbstdichtenenden Deckelverschluss vornehmlich für Druckbehälter darstellt (Sandager et al. 1950). Abbildung 12.22 zeigt

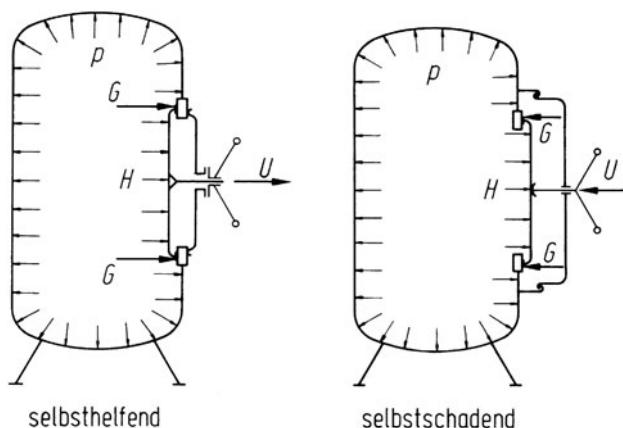
**Abb. 12.23** Anordnung eines Mannlochdeckels.

U Ursprungswirkung;

H Hilfswirkung;

G Gesamtwirkung;

p Innendruck



schematisch eine solche Anordnung. Der Deckel 1 wird mit Hilfe einer zentralen Schraube 2 über die Traverse 3 und Gewindestück 4 gegen die Dichtung 5 mit einer relativ geringen Kraft gepresst. Diese Kraft stellt die Initial- oder Ursprungswirkung dar und sorgt dafür, dass die Teile in der richtigen Lage miteinander Kontakt haben. Mit zunehmendem Betriebsdruck  $p$  wird nun aus der Deckelkraft = Innendruck  $\times$  Deckelfläche eine Hilfswirkung aufgebaut, die die Dichtkraft an den Dichtstellen sowohl am Deckel als auch am Gehäuse im notwendigen Maße als gewünschte Gesamtwirkung steigen lässt. Mit Hilfe des jeweiligen Betriebsdrucks wird der dazugehörige Dichtring also selbstdämmig erzeugt.

Angeregt durch diese selbstdichtende konstruktive Lösung wurde dann in Pahl (1963; 1973c) das Prinzip der Selbsthilfe formuliert und von Kühnpast (1968), umfassend untersucht und dargestellt.

Es kann zweckmäßig sein, den Anteil der Hilfswirkung  $H$  an der Gesamtwirkung  $G$  quantitativ anzugeben, man erhält dann den

$$\text{Selbsthilfegrad } \kappa = H/G = 0 \dots 1.$$

Den Gewinn, den man mit der selbsthelfenden Lösung erreichen kann, bezieht man auf eine oder mehrere technische Anforderungen: Wirkungsgrad, Gebrauchsdauer, Werkstoffausnutzung, technische Grenze usw.

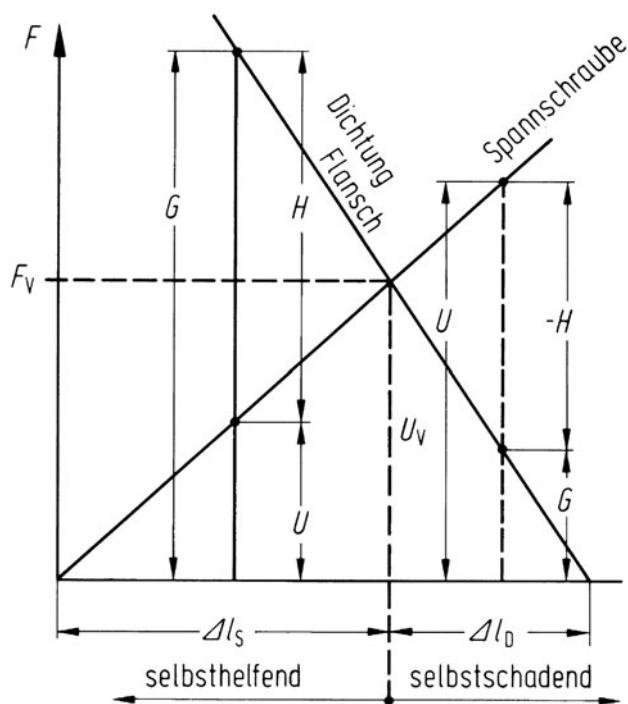
Es wird definiert als

$$\text{Selbsthilfegewinn: } \gamma = \frac{\text{technische Kenngröße mit Selbsthilfe}}{\text{technische Kenngröße ohne Selbsthilfe}}$$

Ist mit dem Prinzip der Selbsthilfe ein konstruktiver Mehraufwand verbunden, muss mit dem Selbsthilfegewinn ein entsprechender Vorteil entstehen, der bei einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung zum Ausdruck kommt.

Gleiche konstruktive Mittel können je nach Anordnung *selbsthelfend* oder *selbstschadend* wirken. Als Beispiel sei die Anordnung eines Mannlochdeckels angeführt, s. Abb. 12.23. Solange in dem Behälter ein gegenüber dem Außendruck höherer Druck herrscht, ist

**Abb. 12.24** Verspannungsdia-  
gramm zu Abb. 12.23.  $F$  Kräfte;  
 $F_V$  Vorspannkraft;  
 $\Delta l$  Längenänderung; Index  
S: Spannschraube, Index  
D: Dichtung/Flansch



die linke Anordnung selbsthelfend, da die Deckelkraft (Hilfswirkung) im Sinne der Spannschraubenkraft (Ursprungswirkung) die Dichtkraft (Gesamtwirkung) erhöht.

Die rechte Anordnung hingegen ist selbstschadend, da die Deckelkraft  $H$  die Dichtkraft  $G$  gegen die Schraubenkraft  $U$  herabsetzt. Würde dagegen im Behälter Unterdruck herrschen, wäre die linke Anordnung selbstschadend, die rechte selbsthelfend (vgl. auch Diagramm in Abb. 12.24).

Aus diesem Beispiel kann man erkennen, dass in Bezug auf den Selbsthilfeeffekt immer die entstehenden Wirkungen zu betrachten sind: hier die aus der elastischen Verspannung sich ergebenden Dichtkräfte und nicht die einfache Addition von Spannschraubenkraft und Deckelkraft. Das Diagramm in Abb. 12.24 ist gleichzeitig ein Kraft-Verformungs-Diagramm einer unter Vorspannung und mit Betriebskraft belasteten Schraubenverbindung. Die herkömmliche Flansch-Schrauben-Verbindung kann man als selbstschadend bezeichnen, denn die gewünschte Gesamtwirkung, nämlich die Dichtkraft, wird im Betriebsfall stets kleiner als die ursprüngliche Vorspannkraft. Die Belastung der Schraube steigt dabei. Wenn möglich, sollten aber Anordnungen gesucht werden, die im selbsthelfenden Bereich liegen, indem mittels Selbsthilfe die gewünschte Gesamtwirkung (Dichtkraft) steigt und die Schraubenbelastung im Betrieb sinkt. (Beispiele für selbsthelfende Anordnung von Schraubenverbindungen findet man in den Abb. 12.27a-d.)

Mit Rücksicht auf die gezielte Anwendung in der Praxis ist es zweckmäßig, selbsthelfende Lösungen wie in Tab. 12.1 zu unterteilen.

**Tab. 12.1** Übersicht zu selbst helfenden Lösungen

		Normallast	Überlast
Art der Selbsthilfe Hilfswirkung infolge	Selbstverstärkend Haupt- und Nebengrößen	Selbstausgleichend Nebengrößen	Selbstschützend geänderte Beanspruchungsart
Wichtiges Merkmal	Haupt- oder Nebengrößen wirken mit anderen Hauptgrößen gleichsinnig	Nebengrößen wirken Hauptgrößen entgegen	Geänderter Kraftfluss z. B. infolge elastischer Verformung; Einschränkung der Funktion zugelassen

## 2. Selbstverstärkende Lösungen

Bei der selbstverstärkenden Lösung wird bereits unter Normallast die Hilfswirkung in fester Zuordnung aus einer funktionsbedingten Hauptgröße und/oder Nebengröße gewonnen, wobei sich eine verstärkte Gesamtwirkung ergibt. Diese Gruppe von selbst helfenden Lösungen ist am häufigsten vertreten. Sie bietet im Teillastbereich besondere Vorteile hinsichtlich größerer Gebrauchs dauer, geringeren Verschleißes, besseren Wirkungsgrads usw., weil die kraftführenden Komponenten nur in dem Maße belastet oder eingesetzt werden, wie sie der augenblickliche Leistungs- oder Lastzustand zur Funktionserfüllung gerade erfordert.

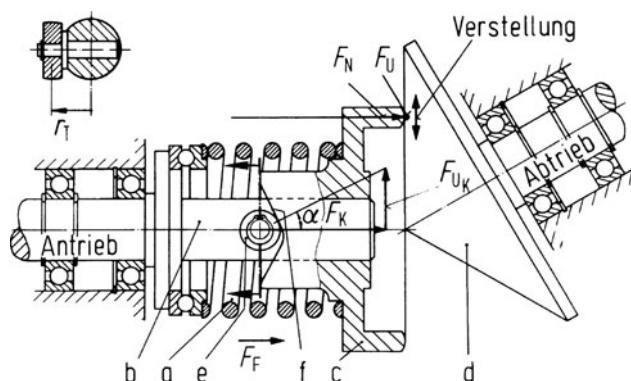
Als erstes Beispiel sei ein stufenlos verstellbares Reibradgetriebe (s. Abb. 12.25) besprochen:

Die Feder a presst den auf der Welle b frei verschiebbaren Topf c gegen die Kegelscheibe d und stellt damit die Ursprungswirkung (Initialwirkung) sicher. Bei Einleitung eines Drehmoments wird die auf der Welle b sitzende Rolle e gegen die schräge Kante f des Topfs c gedrückt und erzeugt dort eine Normalkraft, die sich in eine Umfangskraft  $F_{UK}$  und eine axiale Kraft  $F_K$  zerlegt, die ihrerseits die Anpresskraft  $F_N$  auf die Kegelscheibe in fester Zuordnung zum Drehmoment erhöht,  $F_K = T/(r_T \cdot \tan \alpha)$ .

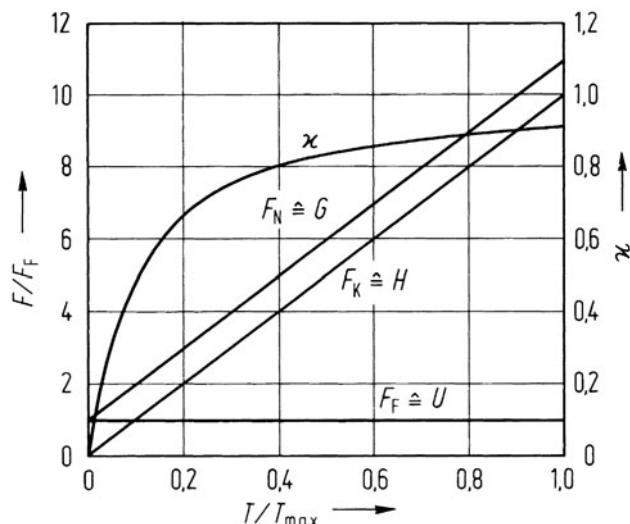
Die Kraft  $F_K$  stellt die aus dem Drehmoment gewonnene Hilfswirkung dar. Die Gesamtwirkung ergibt sich aus der Federkraft  $F_F$  (Ursprungswirkung) und der vom Drehmoment  $T$  abhängigen Kraft  $F_K$  (vgl. Diagramm Abb. 12.26). Die für das übertragbare Drehmoment maßgebende Umfangskraft ist somit  $F_U = (F_F + F_K) \cdot \mu$ , der Selbsthilfegrad  $\kappa = H/G = F_K/(F_F + F_K)$ .

Es ist einsichtig, dass z. B. die Pressung an der Reibscheibe, die den Verschleiß und die Gebrauchs dauer eines solchen Triebes mitbestimmt, nur in dem Maße aufgebaut wird, wie es gerade erforderlich ist. Eine konventionelle Lösung ohne Selbstverstärkung hätte eine mit der Federkraft  $F_F$  allein aufzubringende Normalkraft entsprechend 100 % Drehmoment erfordert, wobei unter allen Lastzuständen die höchste Pressung an der Reibstelle geherrscht hätte. Damit wären auch die Lagerstellen des Getriebes ständig merklich höher belastet worden, was zu verminderter Gebrauchs dauer oder zu einer schwereren Bauart geführt hätte.

**Abb. 12.25** Stufenlos verstellbares Reibradgetriebe.  
 a Vorspannfeder;  
 b Antriebswelle; c Topfscheibe;  
 d Kegelscheibe; e Rolle;  
 f schräge Kante an Topfscheibe;  
 $r_T$  Radius, an dem  $F_{UK}$  und  $F_K$  angreifen



**Abb. 12.26** Selbsthilfegrad  $\kappa$  sowie Ursprungs-(U), Hilfs-(H) und Gesamtwirkung ( $G$ ) in Abhängigkeit vom bezogenen Drehmoment  $T/T_{\max}$  für Reibradgetriebe nach Abb. 12.25

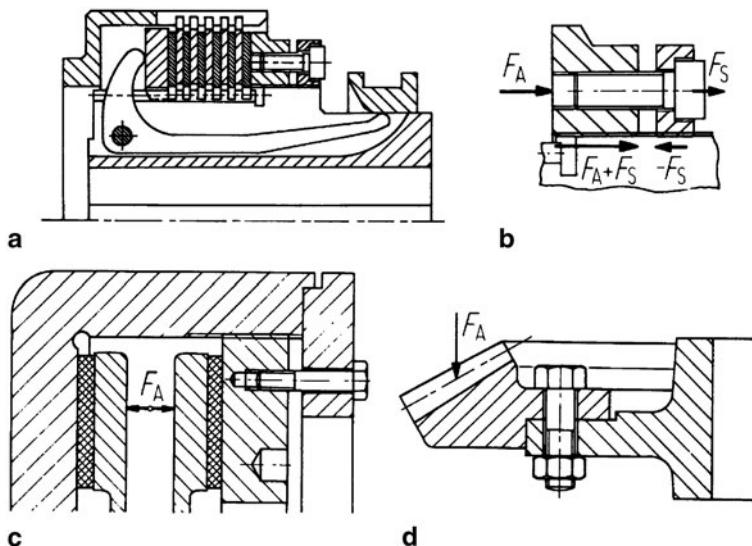


Ein Überschlag zeigt, dass z. B. der Teillastbetrieb von etwa 75 % der Nennlast eine Lagerentlastung um etwa 20 % bewirkt, was wegen des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Lebensdauer und Lagerlast zu einer Verdoppelung der theoretischen Gebrauchs-dauer führen kann. Der Selbsthilfegewinn hinsichtlich der Lagerlebensdauer wird in diesem Fall wie folgt definiert:

$$\gamma_L = \frac{L_{\text{mit Selbsthilfe}}}{L_{\text{ohne Selbsthilfe}}} = \left( \frac{C/(0,8F_L)}{C/F_L} \right)^p = 1,25^p$$

mit  $p = 3$  wird  $\gamma_L = 2$ .

Ein typisches Beispiel ist der Sespa-Antrieb (Köhler und Rögnitz 1981). Abbildung 12.27 zeigt weiterhin selbstverstärkende Anordnungen durch von Schrauben verspannte Kontakt-flächen, bei denen die Reibkräfte in Folge der Betriebskräfte verstärkt, die Schrauben aber entlastet werden.



**Abb. 12.27** Selbstverstärkende, reibschlüssige Verbindungen mit Hilfe von Schrauben. **a** Lamellenkopplung mit Einstellring, **b** Kräfte am Einstellring, **c** einstellbare Scheibe an Zweiseibensreibungskupplung, **d** Tellerradbefestigung, symmetrischer Angriff der Kräfte

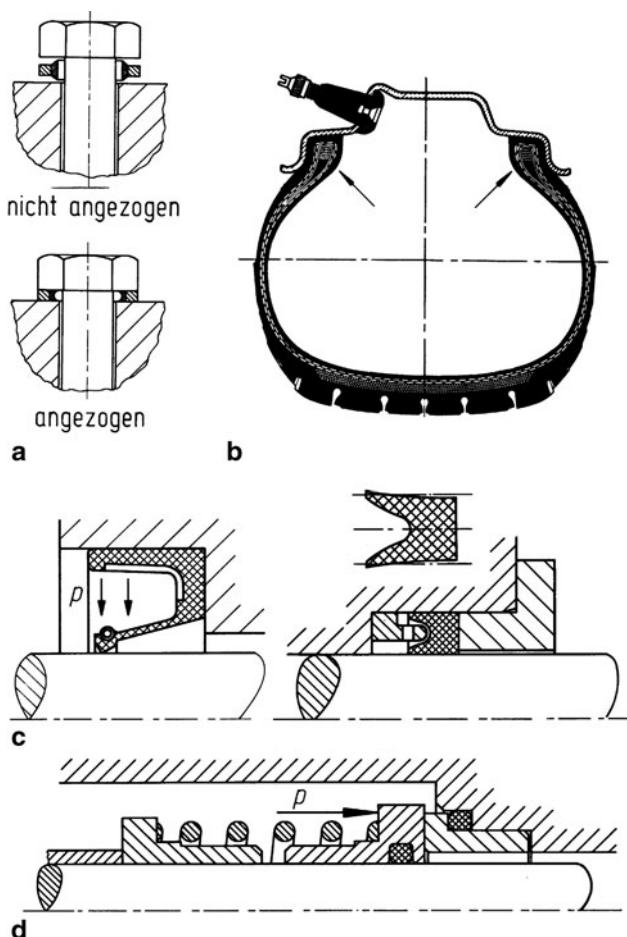
Die Anwendung des Prinzips der Selbsthilfe auf selbstverstärkende Bremsen beschreiben Kühnpast (1968) und Roth (1960). Je nach Anwendung kann sogar die selbstschädigende, hier selbstschwächende Lösung interessant sein, die die Auswirkung von Reibungsschwankungen auf das Bremsmoment reduziert (Falk 1967; Roth 1960).

Ein weiteres Feld nehmen die selbstverstärkenden Dichtungen ein, s. Abb. 12.28. Hier wird der jeweilige Betriebsdruck, gegen den abgedichtet werden muss, zur Erzeugung der Hilfswirkung herangezogen.

Schließlich soll auch ein Fall nicht unerwähnt bleiben, bei dem eine Nebengröße die Hilfswirkung erzeugt. Bei einem hydrostatischen Axiallager tritt durch Zentrifugalkraftwirkung eine Druckerhöhung ein, die nach Abb. 12.29 bei hohen Drehzahlen eine Tragfähigkeitsverbesserung erzielt, sofern die entstehende Wärme abgeführt werden kann. Die Hilfswirkung wäre die Tragfähigkeitsverbesserung infolge des unter Zentrifugalkraftwirkung allein entstehenden kinetischen Oldrucks, die Gesamtwirkung entsteht aus der Tragfähigkeit des statischen und des kinetischen Druckverlaufs. Nach Kühnpast (1968) könnte z. B. bei einer Drehzahl von 166 U/s bei einem Selbsthilfegrad von  $\kappa = 0,38$  ein Selbsthilfegewinn von  $\gamma = 1,6$  gegenüber dem Stillstand erreicht werden.

Eine Hilfswirkung einer weiteren Nebengröße, nämlich des Temperatureinflusses bei Schrumpfringen einer Turbine, ist in Pahl (1963) dargestellt.

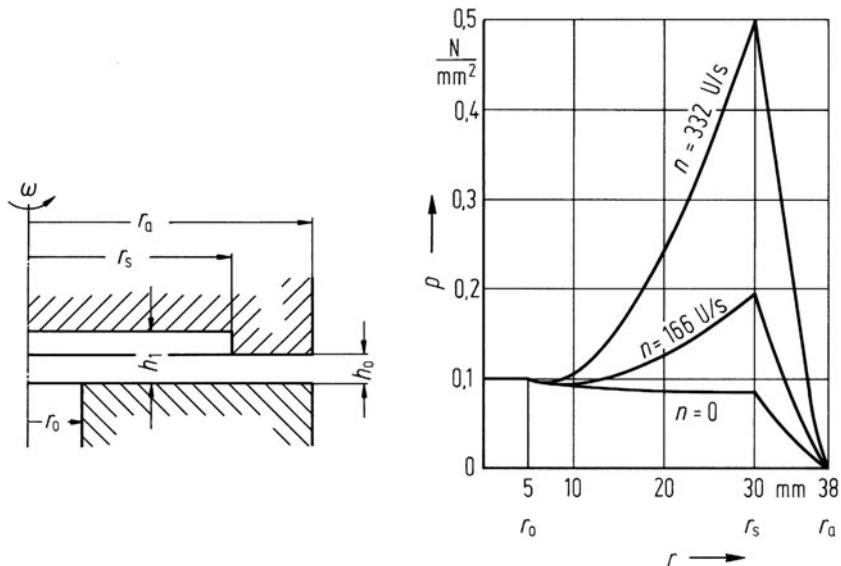
**Abb. 12.28** Selbstverstärkende Dichtungen.  
**a** Selbdichtende Unterlegscheibe „Usit-Ring“, **b** schlauchloser Autoreifen, **c** Radial-Wellendichtung, **d** Manschettendichtung, **e** Gleitringdichtung



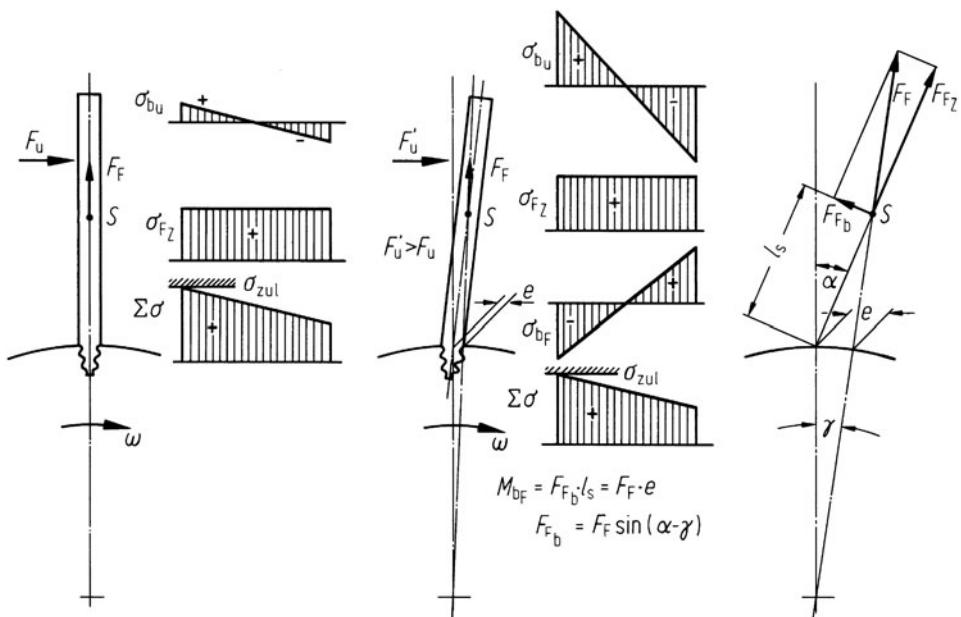
### 3. Selbstausgleichende Lösungen

Bei der selbstausgleichenden Lösung wird ebenfalls bereits unter Normallast eine ausgleichende Hilfswirkung aus begleitenden Nebengrößen in fester Zuordnung zu einer Hauptgröße gewonnen, wobei die Hilfswirkung der Ursprungswirkung entgegenwirkt und dadurch einen Ausgleich erzielt, der eine höhere Gesamtwirkung ermöglicht.

Ein einfaches Beispiel ist im Turbomaschinenbau zu finden. Eine auf einem Rotor befestigte Schaufel unterliegt einmal der Biegebeanspruchung der auf sie wirkenden Umfangskraft und zum anderen der Zentrifugalkraftbeanspruchung. Beide addieren einander und gestatten dann wegen Erreichen der zulässigen Spannung nur eine bestimmte übertragbare Umfangskraft, s. Abb. 12.30. Durch Schrägstellen der Schaufel erzeugt man eine Hilfswirkung, indem eine weitere, nun zusätzlich auftretende Biegebeanspruchung aus der am exzentrischen Schwerpunkt der Schaufel angreifenden Zentrifugalkraft der ursprünglichen Biegebeanspruchung entgegenwirkt und so eine größere Umfangskraft, d. h. Schaufelleistung, ermöglicht. Wie weit man einen solchen Ausgleich treibt, hängt von den aerodynamischen und mechanischen Bedingungen ab.

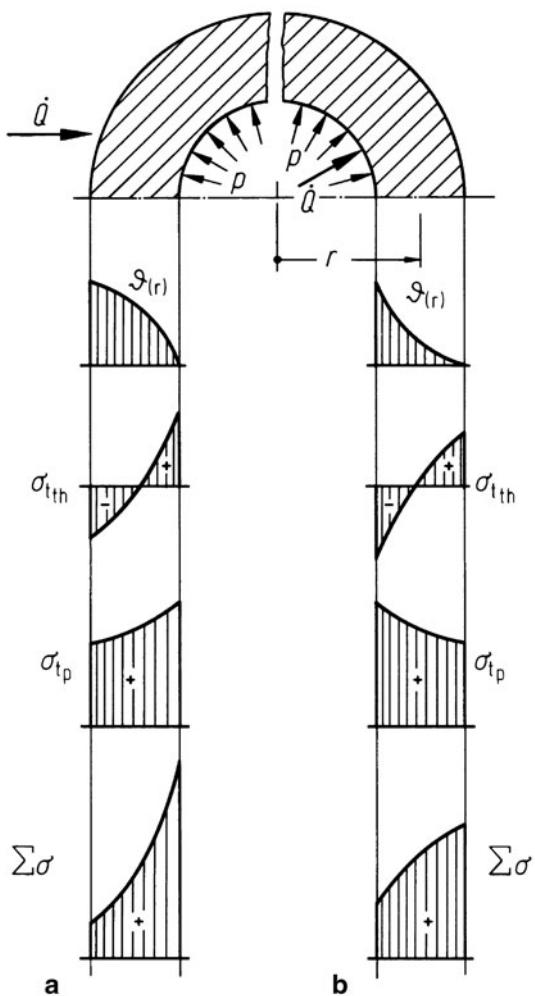


**Abb. 12.29** Selbsthilfeeffekt bei hydrostatischen Axiallagern (nach Kühnpast 1968)



**Abb. 12.30** Selbstausgleichende Lösung bei der Anordnung von Schaufeln in Strömungsmaschinen.  
**a** Konventionelle Lösung, **b** Schrägstellung der Schaufel ergibt ausgleichende Hilfswirkung infolge zusätzlicher Fliehkraftbeanspruchung  $\sigma_{bf}$ , die der Schaufelbiegebeanspruchung  $\sigma_{bu}$  entgegenwirkt und dadurch eine größere Umfangskraft ermöglicht, **c** zugehöriges Kräftediagramm

**Abb. 12.31** Tangentialspannungen in einem dickwandigen Rohr infolge des Innendrucks  $\sigma_{tp}$  und der Temperaturunterschiede unter quasistationärem Wärmefluss  $\sigma_{th}$ . **a** Nichtausgleichende Lösung: thermische Beanspruchung addiert sich an der Innenfaser zur maximalen mechanischen Beanspruchung, **b** selbstausgleichende Lösung: thermische Beanspruchung wirkt an der Innenfaser der maximalen mechanischen Beanspruchung entgegen

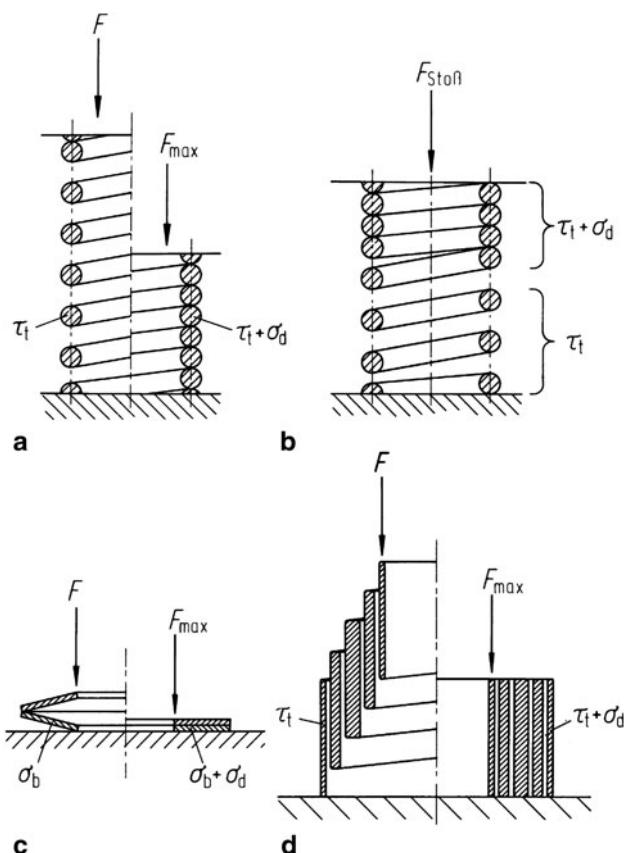


Ein ebenfalls selbstausgleichender Effekt ist z. B. mit Hilfe von Wärmespannungen möglich, indem man die Anordnung so wählt, dass die entstehenden Wärmespannungen den anderen z. B. aus Überdruck oder sonstigen mechanischen Belastungen entgegenwirken, s. Abb. 12.31.

Die Beispiele sollen anregen, in einem technischen System Anordnungen oder Gestaltungen so vorzunehmen, dass

- Kräfte und Momente mit ihren resultierenden Beanspruchungen einander weitgehend aufheben oder
- zusätzliche Kräfte oder Momente in fester, definierter Zuordnung entstehen, die einen solchen Ausgleich zur Leistungserhöhung ermöglichen.

**Abb. 12.32** Selbstschützende Lösung bei Federn. **a–d**  
Blocksetzen erzeugt andere Kraftflussverteilung mit geänderter Beanspruchungsart, ursprüngliche Funktionsfähigkeit im Überlastfall aufgehoben bzw. eingeschränkt

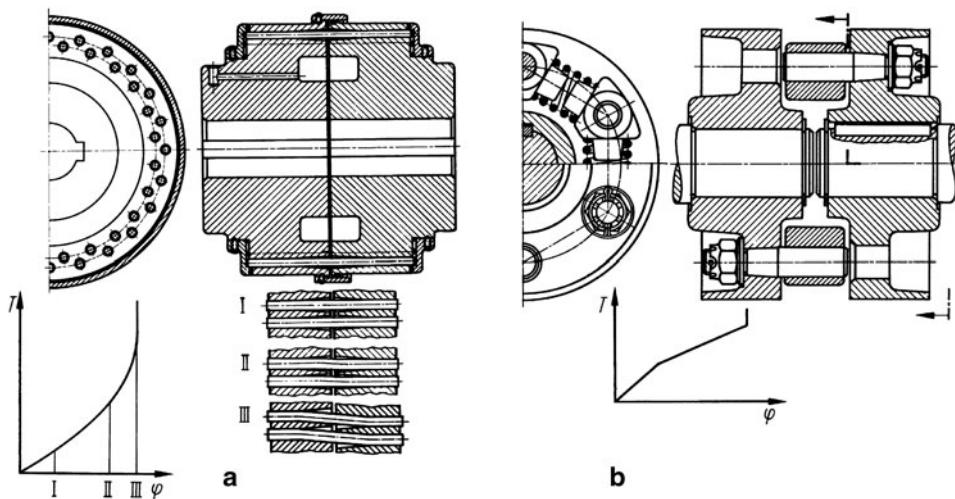


#### 4. Selbstschützende Lösungen

Tritt der Überlastfall ein, so sollte, wenn nicht eine Sollbruchstelle o. Ä. gefordert ist, das Bauteil nicht zerstört werden. Dies gilt besonders dann, wenn der Überlastfall in begrenzter Höhe mehrfach auftreten kann. Sind besondere Sicherheitseinrichtungen, die z. B. eine bestimmte Lasthöhe begrenzen müssen, nicht nötig, ist eine selbstschützende Lösung vorteilhaft. Sie bietet sich manchmal auf einfache Weise an.

Die selbstschützende Lösung bezieht ihre Hilfswirkung aus einem zusätzlichen anderen Kraftleitungsweg, der bei Überlast im Allgemeinen mittels elastischer Verformung erreicht wird. Dadurch entsteht eine andere Kraftflussverteilung und somit auch eine andere Beanspruchungsart, die insgesamt tragfähiger ist. Allerdings werden dabei oft die unter Normallast bestehenden funktionellen Eigenschaften entweder geändert, eingeschränkt oder aufgehoben.

Die in Abb. 12.32 dargestellten Federelemente haben solche selbstschützenden Eigenschaften. Man bezeichnet dies auch mit Blocksetzen. Die im Normalfall unter Torsions- oder Biegebeanspruchung stehenden Federteile leiten beim Blocksetzen im Überlastfall die



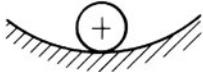
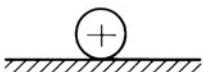
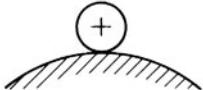
**Abb. 12.33** Selbstschützende Lösung bei Kupplungen, Kraftflussänderung unter Verzicht auf elastische Eigenschaften im Überlastfall. **a** Federstabkupplung, **b** elastische Kupplung mit Schraubenfedern und besonderen Anschlägen zur Übernahme der Kräfte bei Überlast

zusätzliche Kraft von Windung zu Windung unter Druckbeanspruchung weiter. Dieser Effekt tritt u. U. auch ein, wenn Federn stoßartig beansprucht werden und die Stoßkraft entsprechend weitergeleitet wird (s. Abb. 12.32b).

Abbildung 12.33 zeigt Bauformen elastischer Kupplungen, die mit dem Begrenzen der Federwege eine andere zusätzliche Art der Kraftleitung erzwingen und dabei, allerdings unter Verlust von Nachgiebigkeit, höhere Kräfte übernehmen können, ohne dass die federnen Glieder zunächst in Mitleidenschaft gezogen werden. Der Beanspruchungszustand der Stabfedern in Abb. 12.33a ändert sich insofern, als neben Biegebeanspruchung im Überlastfall an der Stelle zwischen den Kupplungshälften nun eine kräftige Scherbeanspruchung hinzutritt.

Abbildung 12.33b zeigt eine Kupplung, die bei strenger Betrachtung als Grenzfall zwischen dem Prinzip der Aufgabenteilung und der selbstschützenden Lösung eingereiht werden kann. Die begrenzenden Anschläge dienen allein der Übernahme von Kräften bei Überlast, die Beanspruchungsart der Federelemente wird nicht geändert, andererseits findet eine andere Kraftflussverteilung statt, die über elastische Formänderung erreicht wird.

Kühnpast (1968) verweist noch auf die Fälle, bei denen eine ungleichmäßige Beanspruchung über dem Querschnitt vorliegt und dann plastisches Verformen ausgenutzt werden kann. Gleichzeitig müssen allerdings ein ausreichend zäher Werkstoff und genügende Formstabilität vorhanden sein. Ferner muss ein gleichsinnig mehrachsiger Spannungszustand vermieden werden.

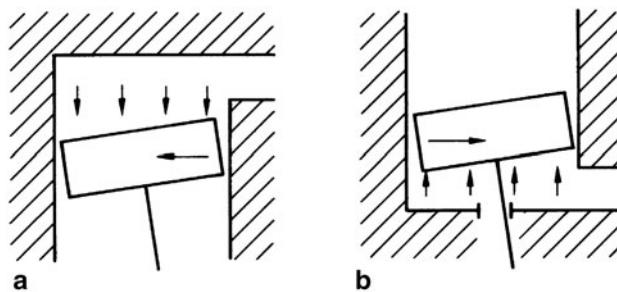
stabil		System kehrt nach einer Störung von selbst in die alte Lage mit vorherigem Gleichgewichtszustand zurück	Bei Auslenkung nimmt die potentielle Energie des ausgelenkten Körpers zu und bewirkt eine Rückführung
indifferent		System nimmt nach der Störung eine neue Lage mit unverändertem Gleichgewichtszustand ein	Bei Auslenkung bleibt die potentielle Energie konstant
labil		System nimmt nach der Störung eine neue Lage mit neuem Gleichgewichtszustand ein	Bei Auslenkung nimmt die potentielle Energie des ausgelenkten Körpers ab und bewirkt eine neue Lage

**Abb. 12.34** Kennzeichnung von Gleichgewichtszuständen

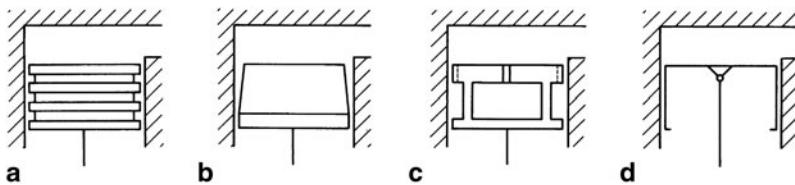
Das Prinzip der Selbsthilfe mit den selbstverstärkenden und selbstausgleichenden sowie den selbstschützenden Lösungen soll den Konstrukteur anregen, alle denkbaren Möglichkeiten der Anordnung und Gestaltung auszunutzen, damit eine wirkungsvolle Lösung mit sparsamen Mitteln entsteht.

## 12.4 Prinzip der Stabilität und Bistabilität (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Aus der Mechanik sind die Begriffe stabil, indifferent und labil bekannt. Sie bezeichnen jeweils einen Zustand, der in Abb. 12.34 beschrieben ist. Bei der Gestaltung von Lösungen muss stets der Einfluss von Störungen bedacht werden. Dabei ist anzustreben, dass das Verhalten des Systems stabil ist, d. h. auftretende Störungen sollten resultierende Wirkungen erzeugen, die der Störung entgegenwirken und sie aufheben oder mindestens mildern. Würden Störungen eine sie verstärkende Wirkung haben, ist das Verhalten labil. Bei einer Reihe von Lösungen ist ein gewollt labiles Verhalten zwischen zwei stabilen Zuständen aber erwünscht. Dieser Effekt führt dann zu einem *bistabilen* Verhalten.



**Abb. 12.35** Kolben in Kolbenführung durch eine Störung schief gestellt (nach Reuter 1958). **a** Resultierende Druckverteilung ergibt Kraftwirkung, die die Störung verstärkt (labiles Verhalten), **b** resultierende Druckverteilung ergibt Kraftwirkung, die der Störung entgegenwirkt (stabiles Verhalten)



**Abb. 12.36** Maßnahmen zur Verbesserung der resultierenden Druckverteilung (nach Reuter 1958). **a** Abgeschwächte labile Kraftwirkung durch Druckausgleichsrillen, **b** stabiles Verhalten durch konischen Kolben, **c** durch Drucktaschen, **d** durch über dem Schwerpunkt des Kurbels am Gelenk angeordnetes Gelenk

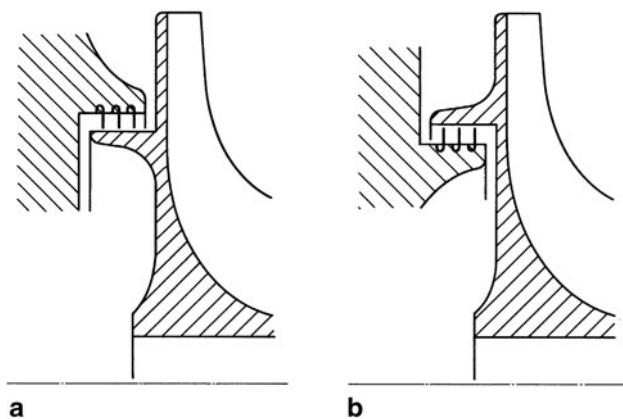
### 1. Prinzip der Stabilität

Die Gestaltung ist so vorzunehmen, dass Störungen eine sie selbst aufhebende oder mindestens mildernde Wirkung hervorrufen. Reuter (1958) hat hierzu umfassend berichtet; ein Teil seiner Beispiele wird wiedergegeben:

Bei der Gestaltung von Kolbenführungen in Pumpen, Steuer- und Regelungsgeräten ist ein stabiles, möglichst reibungsfreies Verhalten erwünscht. Abbildung 12.35a zeigt die Anordnung eines Kolbens, der ausgesprochen labiles Verhalten aufweist. Bei einer Störung durch Schieffstellen bedingt, z. B. durch Lagefehler der Kolben- und Lagerbohrungssachsen, entsteht eine Druckverteilung am Kolben, die die Schieflage unterstützt (labiles Verhalten). Ein stabiles Verhalten wird durch die Anordnung nach Abb. 12.35b erzielt, wobei sie allerdings den Nachteil hat, dass auf der druckführenden Seite die Stangendurchführung mit Abdichtung erfolgen muss.

Stabilisierende Wirkungen lassen sich nach Reuter (1958) bei einer Anordnung nach Abb. 12.35a auch durch die in Abb. 12.36a-d gezeigten Maßnahmen erzielen. Sie werden dadurch gewonnen, dass bei Auftreten einer Störung diese selbst durch entsprechende Druckverteilung Kraftwirkungen an der Kolbenlauffläche hervorruft, die ihr entgegenwirken.

**Abb. 12.37** Ausgleichskolbendichtung an einem Turboladerrad  
(nach Reuter 1958)



Ein weiteres Beispiel ist der bekannte Kraftmechanismus bei hydrostatischen Gleitlagern mit über dem Umfang mehrfach unterteilten Drucktaschen. Bei Aufbringen der Lagerlast tritt in Lastrichtung eine Verringerung des Leckagespaltes ein, und dadurch baut die betroffene Drucktasche einen größeren Taschendruck auf, der zusammen mit dem Druckabbau der gegenüberliegenden Drucktasche die Lagerlast bei sehr geringer Wellenverlagerung, d. h. hoher Steifigkeit, aufzunehmen vermag.

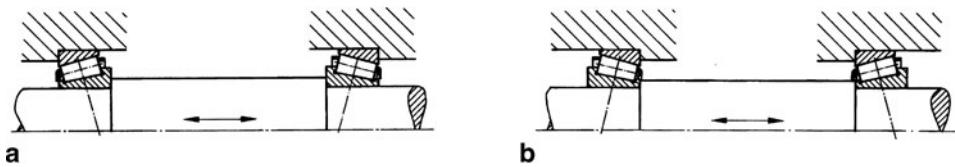
Ein sog. wärmestabiles Verhalten wird bei berührungslosen Stopfbüchsen in thermischen Turbomaschinen angestrebt (Reuter 1958). Am Beispiel der Dichtung am Ausgleichskolben eines Turboladers sind in Abb. 12.37a die wärmelabile und in Abb. 12.37b die wärmestabile Anordnung aufgezeigt. Bei der labilen Anordnung fließt im Anstreiffall die entstehende Reibungswärme vornehmlich in das innere Teil, welches sich stärker erwärmt, sich ausdehnt und damit den Anstreifvorgang verstärkt. Die stabile Anordnung lässt die entstehende Reibungswärme vornehmlich in das äußere Teil fließen. Bei dessen Erwärmung und Ausdehnung wird der Anstreifvorgang vermindert. Die eingeleitete Störung ergibt ein Verhalten, das der Störung entgegenwirkt.

Gleiche Gesichtspunkte findet man bei Anordnungen von Kegelrollenlagern. Die Anordnung nach Abb. 12.38a hat bei Wellenerwärmung, z. B. durch Überlast, die Tendenz der Lastverstärkung durch den wirksam werdenden Ausdehnungseffekt infolge zunehmender Reibungswärme. Die Anordnung nach Abb. 12.38b hingegen ruft eine Entlastungstendenz hervor. Diese darf im konkreten Fall allerdings nicht so weit gehen, dass die Kegelrollen über dem Umfang nicht mehr voll belastet sind, weil dann die in Lastrichtung befindlichen Wälzkörper wieder überlastet würden.

Ein interessantes Beispiel für wärmestabiles Verhalten findet man bei doppelschrägverzahnten Großgetrieben im Schiffsbau (Welch 1961).

## 2. Prinzip der Bistabilität

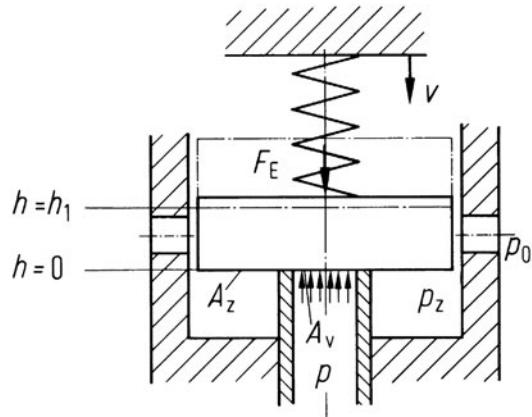
Es gibt Fälle, in denen ein bestimmtes labiles, auch als bistabil benanntes Verhalten gefordert wird. Das tritt ein, wenn bei Erreichen eines Grenzzustands aus einem stabilen Zustand ein



**Abb. 12.38** Kegelrollenlageranordnung, bei der die Welle sich stärker erwärmt als das Gehäuse. **a** Wärmedehnung bewirkt Belastungserhöhung und damit labiles Verhalten, **b** Wärmedehnung bewirkt Belastungsminderung und damit stabiles Verhalten

**Abb. 12.39** Lösungsprinzip

für ein bistabil öffnendes Ventil.  $v$  Vorspannweg der Feder;  $c$  Federsteifigkeit der Feder;  $F_E$  Federkraft;  $h$  Hub des Ventiltellers;  $p$  Druck vor Ventil;  $P_G$  Grenzdruck, bei dem Ventil gerade öffnet;  $p_z$  Zwischendruck beim Öffnen;  $p'$  Zwischendruck nach dem Öffnen;  $p_0$  Umgebungsdruck;  $A_V$  Ventilöffnungsfläche;  $A_z$  Zusatzfläche



neuer, deutlich abgesetzter anderer stabiler Zustand oder eine andere Lage erreicht werden soll und Zwischenzustände dabei unerwünscht sind. Die so gewollte Zwischen-Labilität wird erzielt, indem eine gewollte Störung Wirkungen erzielt, die sie selbst unterstützen und verstärken. Das System geht dann in einen neuen stabilen Zustand über. Dieses bistabile Verhalten wird z. B. bei Schaltern und Schutzsystemen verlangt.

Eine bekannte Anwendung ist die Gestaltung von Sicherheits- oder Alarmventilen (Reuter 1958), die bei Erreichen eines Grenzdrucks von der voll geschlossenen in eine voll geöffnete Stellung springen sollen, um unerwünschte Zustände mit nur geringer Ablassmenge oder mit flatternden Ventilbewegungen mit entsprechendem Verschleiß des Ventilsitzes zu vermeiden. Abbildung 12.39 erläutert das Lösungsprinzip:

$$\text{Ventil geschlossen: } F_E = c \cdot v > p \cdot A_V \quad h \approx 0$$

$$\text{Ventil öffnet gerade: } F_E = c \cdot v \leq p_G \cdot A_V \quad h \approx 0$$

$$\text{Ventil öffnet voll: } F_E = c \cdot (v + h) < p \cdot A_V + p_z \cdot A_z, \quad h \rightarrow h_1$$

$$\text{Ventil voll offen: } F_E = c \cdot (v + h_1) = p' \cdot (A_V + A_z), \quad h = h_1$$

(neue Gleichgewichtslage)

Bis zum Grenzdruck  $p = p_G$  bleibt das Ventil unter der Vorspannkraft der Feder geschlossen. Wird dieser Druck überschritten, hebt der Ventilteller etwas ab. Es entsteht dadurch

**Abb. 12.40** Schematische

Darstellung eines

Druckschalters zur

Lagerölüberwachung nach

Reuter (1958).

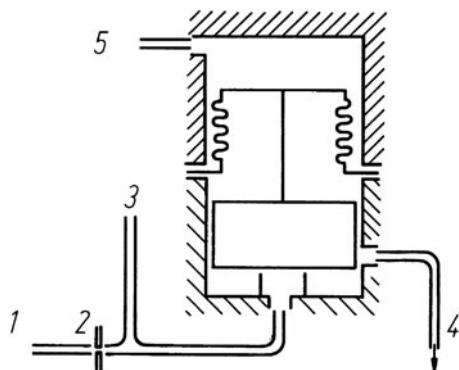
1 Hauptölsystem; 2 Blende;

3 Schutzsystem steuert

Schnellschlussventile; 4 Ablauf,

drucklos; 5 Lagerölleitung mit

Lageröldruck



ein Zwischendruck  $p_z$ , da der Ventilteller den Austritt nach außen drosselt. Dieser Druck  $p_z$  wirkt auf die Zusatzfläche  $A_z$  des Ventiltellers und erzeugt eine weitere Öffnungskraft, die die Federkraft  $F_E$  so weit überwindet, dass der Ventilteller eine nicht proportionale, sondern sprunghafte Öffnungsbewegung macht. Im geöffneten Zustand stellt sich ein anderer Zwischendruck  $p'$  ein, der das Ventil mit Hilfe der Wirkflächen offen hält. Zum Schließen des Ventils ist eine gegenüber dem Grenzöffnungsdruck größere Druckabsenkung nötig, weil ja eine größere Wirkfläche am Ventilteller im geöffneten Zustand vorhanden ist.

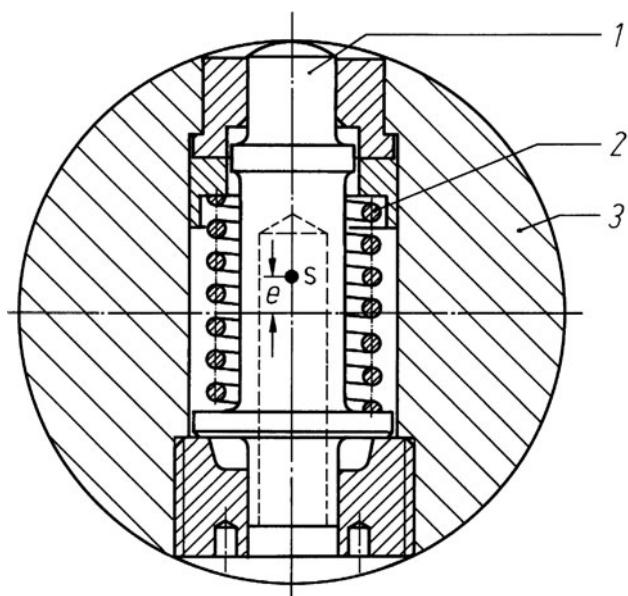
Eine weitere Anwendung zeigt Abb. 12.40 für einen Druckschalter als Überwachungsgerät des Lageröldrucks. Unterschreitet der Lageröldruck einen bestimmten Wert, öffnet der das Schutzsystem abschließende Kolben schlagartig, und der Druck im Schutzsystem wird so weit erniedrigt, dass die betreffende Maschine abgeschaltet wird.

Von dem Prinzip der Bistabilität machen auch Schnellschlusseinrichtungen Gebrauch, bei denen ein unter Federvorspannung stehender Schlagbolzen mit seinem Schwerpunkt eine zur Drehachse exzentrische Lage einnimmt, s. Abb. 12.41. Bei einer bestimmten Grenzdrehzahl beginnt der Schlagbolzen sich gegen die Federvorspannkraft nach außen zu bewegen. Dadurch wird die auf ihn wirkende Zentrifugalkraft durch Exzentrizitätsvergrößerung des Schwerpunkts größer, so dass er auch ohne weitere Drehzahlerhöhung labil nach außen fliegt. Die Bedingung dabei ist, dass bei beginnender Verlagerung  $x$  des Bolzenschwerpunkts der Kraftanstieg der Zentrifugalkraft über  $x$  größer als der der entgegenwirkenden Federkraft sein muss. Dies ist bei Kraftgleichheit im Grenzzustand ( $\omega = \omega_g$ ) mit verschiedener Kraftcharakteristik über  $x$  nach der Bedingung  $dF_F/dx > dF_E/dx$  oder  $m \cdot \omega_g^2 > c$  zu erreichen, s. Abb. 12.42.

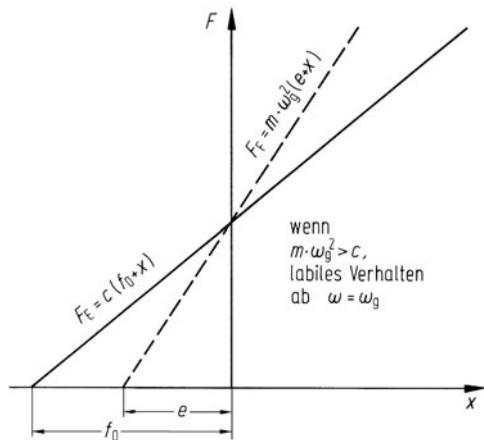
Der Schlagbolzen trifft im nach außen verlagerten Zustand auf eine Klinke, die ihrerseits die Schnellschlusabetätigung der Einlassorgane auslöst.

Vielfach werden heute bei Produkten instabile Zustände durch eine entsprechende Regelung ausgeglichen. Dank entsprechend schneller Hard- und Software gelingt es so, im Prinzip instabile Systeme in einen stabilen Zustand zu bringen und zu halten. Ein bekanntes Beispiel für ein solches an sich instabiles System ist der „Segway“, s. Abb. 12.43.

**Abb. 12.41** Schnellschlussbolzen 1 in Welle 3 mit um  $e$  exzentrisch liegendem Schwerpunkt S und Feder 2, die den Bolzen in Ruhelage hält (nach Reuter 1958)



**Abb. 12.42** Kraftcharakteristik von Federkraft und Fliehkraft über dem Weg  $x$  des Schwerpunktes des Schnellschlussbolzens nach Abb. 12.41.  $e$  Exzentrizität des Schwerpunktes;  $f_0$  Federvorspannweg;  $\omega_g$  Grenzdrehzahl, ab der der Schnellschlussbolzen labil abhebt



## 12.5 Prinzip der fehlerarmen Gestaltung (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Vor allem bei Produkten der Feinwerktechnik eingeführt und bewährt, aber auch bei allen technischen Systemen anzustreben, ist eine Gestaltung, bei der eine Fehlerminimierung schon dadurch erreicht wird, dass

**Abb. 12.43** Durch Regelung stabilisiertes System: „Segway“



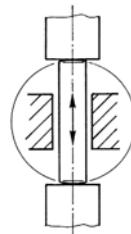
- Baustuktur und Bauteile einfach sind und dadurch wenig toleranzbehaftete Abmessungen aufweisen,
- eine Minimierung von Fehlereinflussgrößen durch konstruktive Maßnahmen angestrebt wird,
- Wirkprinzipien und Wirkstrukturen gewählt werden, bei denen die Funktionsgrößen weitgehend unabhängig von den Störgrößen sind (Invarianz) bzw. nur eine geringe Abhängigkeit voneinander aufweisen und
- auftretende Störgrößen gleichzeitig zwei sich gegenläufig verändernde Strukturparameter beeinflussen (Kompensation).

Beispiele für dieses wichtige Prinzip (Krause 1986; Schilling 1991; Walczak 1986), das eine Fertigungs- und Montagevereinfachung sowie eine gleichbleibende Produktqualität unterstützt, sind:

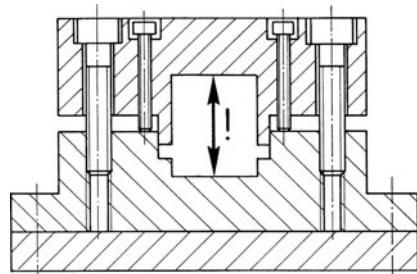
- elastische und einstellbare Bauweise, z. B. bei Mehrweggetrieben zum Ausgleich von Verzahnungstoleranzen (s. Abb. 12.18 und 12.20);
- geringe Schrauben- und Federsteifigkeiten zur Abschwächung von Fertigungstoleranzen bei vorgespannten Schraubenverbindungen und Federungssystemen;
- einfache Baustrukturen mit einer geringen Anzahl von Teilen sowie wenigen Passstellen und toleranzbehafteten Fügeverbindungen;
- Nachstell- und Justiermöglichkeiten, um gröbere Bauteiltoleranzen zulassen zu können;
- Prinzip der Stabilität.

Abbildung 12.44 zeigt als einfaches Beispiel die spielinvariante Anordnung eines Druckstößels zur genauen Übertragung eines Weges. Durch die Gestaltung der Stößelendflächen

**Abb. 12.44** Spielvariante  
Gestaltung eines  
Übertragungsgliedes (nach  
Krause 1986)



**Abb. 12.45** Kontinuierliche  
Einstellmöglichkeit zum  
einfachen Einhalten enger  
Abmessungstoleranzen (nach  
Stöferle et al. 1974)



als Kugelkappen einer gemeinsamen Kugel bleibt der Abstand zwischen Antriebs- und Abtriebsglied trotz Kippen des Stößels infolge Führungsspiel unverändert (Krause 1986).

Das Beispiel nach Abb. 12.45 zeigt das Vorsehen kontinuierlicher Einstellmöglichkeiten, die das Einhalten einer eng tolerierten Kavität bei einer geteilten Gießform oder ähnlichem erleichtert.

## Literatur

- Kesselring F (1954) Technische Kompositionslehre. Springer, Berlin  
 Leyer A (1974) Kraft- und Bewegungselemente des Maschinenbaus. technica 26 (1973) 2498–2510,  
 2507–2520, technica 5 (1974) 319–324, technica 6 (1974) 435–440  
 Leyer A (1963–1978) Maschinenkonstruktionslehre, Hefte 1–7, technica-Reihe. Birkhäuser, Basel

## Abschnitt 12.1

- Ehrlenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung, 4. Aufl. Carl Hanser, München  
 Häusler N (1974) Der Mechanismus der Biegemomentübertragung in Schrumpfverbindungen. Diss.  
 TH Darmstadt  
 Leyer A (1974) Kraft- und Bewegungselemente des Maschinenbaus. technica 26 (1973) 2498–2510,  
 2507–2520, technica 5 (1974) 319–324, technica 6 (1974) 435–440  
 Leyer A (1963–1978) Maschinenkonstruktionslehre, Hefte 1–7, technica-Reihe. Birkhäuser, Basel

- Maduschka L (1936) Beanspruchung von Schraubenverbindungen und zweckmäßige Gestaltung der Gewindeträger. *Forsch Ing Wes* 7:299–305
- Magyar J (o. J.) Aus nichtveröffentlichtem Unterrichtsmaterial der TU Budapest. Lehrstuhl für Maschinenelemente
- Matting A, Ulmer K (1963) Spannungsverteilung in Metallkleverbindungen. *VDI-Z* 105:1449–1457
- Militzer OM (1975) Rechenmodell für die Auslegung von Wellen-Naben-Passfederverbindungen. Diss. TU Berlin
- Pahl G (1967) Entwurfsingenieur und Konstruktionslehre unterstützen die moderne Konstruktionsarbeit. *Konstruktion* 19:337–344
- Pahl G (1973a) Prinzipien der Kraftleitung. *Konstruktion* 25:151–156
- Paland EG (1960) Untersuchungen über die Sicherungseigenschaften von Schraubenverbindungen bei dynamischer Belastung. Diss. TH Hannover
- Rixmann W (1962) Ein neuer Ford-Taunus 12 M. *ATZ* 64:306–311
- Thum A (1944) Die Entwicklung von der Lehre der Gestaltfestigkeit. *VDI-Z* 88:609–615
- Wiegand H, Kloos K-H, Thomala W (1988) Schraubenverbindungen. In: Pahl G (Hrsg) *Konstruktionsbücher*, Bd 5, 4. Aufl. Springer, Berlin

## Abschnitt 12.2

- Ehrlenspiel K (1967) Planetengetriebe – Lastausgleich und konstruktive Entwicklung. *VDI-Berichte Nr 105*. VDI Verlag, Düsseldorf, S 57–67
- Ehrlenspiel K (1969) Mehrweggetriebe für Turbomaschinen. *VDI-Z* 111:218–221
- Pahl G (1972) Bewährung und Entwicklungsstand großer Getriebe in Kraftwerken. Mitteilungen der VGB 52, *Kraftwerkstechnik* S 404–415
- Pahl G (1973b) Prinzip der Aufgabenteilung. *Konstruktion* 25:191–196

## Abschnitt 12.3

- Falk K (1967) Theorie und Auslegung einfacher Backenbremsen. *Konstruktion* 19:268–271
- Köhler G, Rögnitz H (1981) *Maschinenteile*, Bd 1 und Bd 2, 6. Aufl. Teubner, Stuttgart
- Kühnpast R (1968) Das System der selbsthelfenden Lösungen in der maschinenbaulichen Konstruktion. Diss. TH Darmstadt
- Pahl G (1963) Konstruktionstechnik im thermischen Maschinenbau. *Konstruktion* 15:91–98
- Pahl G (1973c) Das Prinzip der Selbsthilfe. *Konstruktion* 25:231–237
- Roth K (1960) Die Kennlinie von einfachen und zusammengesetzten Reibsystemen. *Feinwerktechnik* 64:135–142
- Sandager, Markovits, Bredtschneider (1950) Piping Elements for Coal-Hydrogenations Service. Trans. ASME May 1950, 370 ff.

## Abschnitt 12.4

- Reuter H (1958) Stabile und labile Vorgänge in Dampfturbinen. *BBC-Nachrichten* 40:391–398
- Welch B (1961) Thermal instability in high-speed-gearing. *J Eng Power* 91 ff.

## Abschnitt 12.5

- Krause W (Hrsg) (1986) Gerätekonstruktion, 2. Aufl. VEB Verlag Technik, Berlin
- Schilling K (1991) Konstruktionsprinzipien der Feinwerktechnik. Proceedings ICED '91, Schriftenreihe WDK 20. Heurista, Zürich
- Stöferle T, Dilling H-J, Rauschenbach T (1974) Rationalisierung und Automatisierung in der Montage. Werkstatt und Betrieb 107:327–335
- Walczak A (1986) Selbstjustierende Funktionskette als kosten- und montagegünstiges Gestaltungsprinzip, gezeigt am Beispiel eines mit methodischen Hilfsmitteln entwickelten Lesegeräts. Konstruktion 38(1):27–30

Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote,  
Jörg Heusel, Thomas Bronnhuber, Werner Hufenbach, Olaf Helms,  
Christopher Schlick, Fritz Klocke, Klaus Dilger und Rainer Müller

---

## 13.1 Zuordnung und Übersicht (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Neben den Grundregeln „eindeutig“, „einfach“ und „sicher“, die aus den generellen Zielsetzungen abgeleitet sind, sind Gestaltungsregeln zu beachten, die sich aus der Leitlinie in Abschn. 10.2.6 ergeben. Im internationalen Bereich werden diese auch als „Design for X“ bezeichnet. Die Gestaltungsrichtlinien helfen den jeweiligen Bedingungen gerecht zu werden und unterstützen die Grundregeln im Besonderen.

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische  
Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

G. Pahl

Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

W. Beitz<sup>†</sup>

Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

J. Heusel · T. Bronnhuber

TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Johann-Maus-Straße 2,  
71254 Ditzingen, Deutschland  
E-Mail: joerg.heusel@de.trumpf.com

T. Bronnhuber

E-Mail: thomas.bronnhuber@de.trumpf.com

Im Folgenden werden aus der Sicht der Autoren wichtige Gestaltungsrichtlinien ohne Anspruch auf Vollständigkeit behandelt. Auf ihre Behandlung wurde dann verzichtet, wenn schon zusammenfassende oder spezielle Literatur vorhanden ist, auf die verwiesen wird.

Letzteres gilt für *beanspruchungsgerecht* (Haltbarkeit):

Grundlagen und elementare Zusammenhänge sind der Literatur über Maschinenelemente und deren Berechnung zu entnehmen (Köhler und Rögnitz 1981; Leipholz 1969; Niemann 2001; ten Bosch 1972).

Eine besondere Bedeutung kommt der Erfassung des *zeitlichen Belastungsverlaufs*, der Höhe und Art der resultierenden Beanspruchung sowie der richtigen Einschätzung im Hinblick auf bekannte Festigkeitshypothesen zu. Durch Schadensakkumulationshypothesen wird versucht, die Lebensdauervorhersage zu verbessern (Bertsche und Lechner 1999; Gassner 1984; Gnilke 1980; Haibach 1989; Schott 1983).

Bei der Beanspruchungsermittlung müssen *Kerbwirkung und/oder ein mehrachsiger Spannungszustand* berücksichtigt werden (Neuber 1985; TGL 19340 1984; VDI 129 1968). Die Beurteilung der Haltbarkeit kann dann nur in Verbindung mit den Festigkeitswerten des Werkstoffes und der sich einstellenden Bauteilfestigkeit unter Verwendung zutreffender Festigkeitshypothesen geschehen (Munz et al. 1971; Tauscher 1982; TGL 19340 1984; VDI 2226 1965; VDI 2227 1974).

---

W. Hufenbach · O. Helms

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden,  
Holbeinstraße 3, 01307 Dresden, Deutschland  
E-Mail: ilk@ilk.mw.tu-dresden.de

O. Helms  
E-Mail: j.o.helms@t-online.de

C. Schlick  
Institut für Arbeitswissenschaft, Rheinisch-Westfälische Technische  
Hochschule Aachen, Bergdriesch 27, 52062 Aachen, Deutschland  
E-Mail: c.schlick@iaw.rwth-aachen.de

F. Klocke  
Werkzeugmaschinenlabor, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: f.klocke@wzl.rwth-aachen.de

K. Dilger  
Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig,  
Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, Deutschland  
E-Mail: k.dilger@tu-braunschweig.de

R. Müller  
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH,  
Gewerbepark Eschberger Weg, Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland  
E-Mail: rainer.mueller@mechatronikzentrum.de

*Formänderungs-, stabilitäts- und resonanzgerechte* Gestaltung findet ihre Grundlage in entsprechenden Berechnungen der Mechanik und Maschinendynamik: Mechanik und Festigkeitsprobleme (Biezeno und Grammet 1953; Leipholz 1969), Schwingungsprobleme (Klotter 1981; Magnus 1976), Stabilitätsprobleme (Pflüger 1964), Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (Zienkiewicz 1984). In Abschn. 12.1 wurden Hinweise zur verformungsgerechten Gestaltung bei Kraftleitungsproblemen gemacht.

In diesem Buch werden u. a. folgende *Gestaltungsrichtlinien* näher behandelt:

Ausdehnungs- und kriechgerechte Gestaltung, nämlich die Berücksichtigung von Temperaturerscheinungen in Abschn. 13.2 und 13.3. Korrosionsgerechte Gestaltung in Abschn. 13.4 und Ursache sowie Erscheinungsformen von Verschleiß sowie die wichtigsten konstruktiven Maßnahmen in Abschn. 13.5.

Ergonomische Gesichtspunkte werden in Abschn. 13.8 angesprochen. Ausführlich sind in Abschn. 13.10 und 13.12 die fertigungs- und montagegerechte Gestaltungen behandelt, die die Gesichtspunkte einer kontroll- und transportgerechten Ausführung teilweise mit umfassen. Gebrauchs- und instandhaltungsgerechte Gestaltungen schließen sich unter Abschn. 13.13 an.

Die Gestaltung nach Recycling-Gesichtspunkten ist in Abschn. 13.14 behandelt. In vielen Fällen ist eine risikogerechte Gestaltung (Abschn. 13.15) wichtig. Eine normgerechte Gestaltung hilft, die genannten Aspekte besser zu erfüllen, und leistet auch einen Beitrag zur Aufwandsverringerung und besseren Termineinhaltung.

---

## 13.2 Ausdehnungsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

In technischen Systemen verwendete Werkstoffe haben die Eigenschaft, sich bei Erwärmung auszudehnen. Probleme entstehen dabei nicht nur im thermischen Maschinenbau, wo von vornherein mit höheren Temperaturen gerechnet werden muss, sondern auch bei leistungsstarken Antrieben und Baugruppen, in denen bei Energiewandlung Verluste entstehen, sowie allen Reibungsvorgängen und Ventilationserscheinungen, die eine Erwärmung bedingen. So werden viele Gestaltungszonen von einer örtlichen Erwärmung betroffen. Aber auch Maschinen, Apparate und Geräte, deren Umgebungstemperatur im größeren Umfang schwankt, arbeiten nur ordnungsgemäß, wenn bei ihnen der physikalische Effekt der Ausdehnung berücksichtigt worden ist (Pahl 1973d; Pahl 1963).

Neben diesem thermisch bedingten Effekt der Längenänderung treten in hochbeanspruchten Bauteilen auch durch mechanisch bedingte Dehnung Längenänderungen auf. Diese Längenänderungen müssen konstruktiv ebenfalls berücksichtigt werden, wozu die nachfolgend angeführten Hinweise prinzipiell auch gelten.

## 1. Erscheinung der Ausdehnung

Die Erscheinung der Ausdehnung ist hinlänglich bekannt. Zur Beschreibung definiert man für feste Körper die Längenausdehnungszahl mit

$$\beta = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta \vartheta_m},$$

$\Delta l$  Längenänderung (Ausdehnung) infolge Erwärmung um  $\Delta \vartheta_m$ ,

$l$  betrachtete Länge des Bauteils und

$\Delta \vartheta_m$  Temperaturdifferenz, um die sich der Körper im Mittel erwärmt.

Nach DIN 1345 wird die Längenausdehnungszahl im Allgemeinen mit  $\alpha$  bezeichnet. Wegen der Bezeichnungsgleichheit mit der Wärmeübergangszahl  $\alpha$ , die in diesem Abschnitt ebenfalls auftritt, wird stattdessen  $\beta$  gewählt.

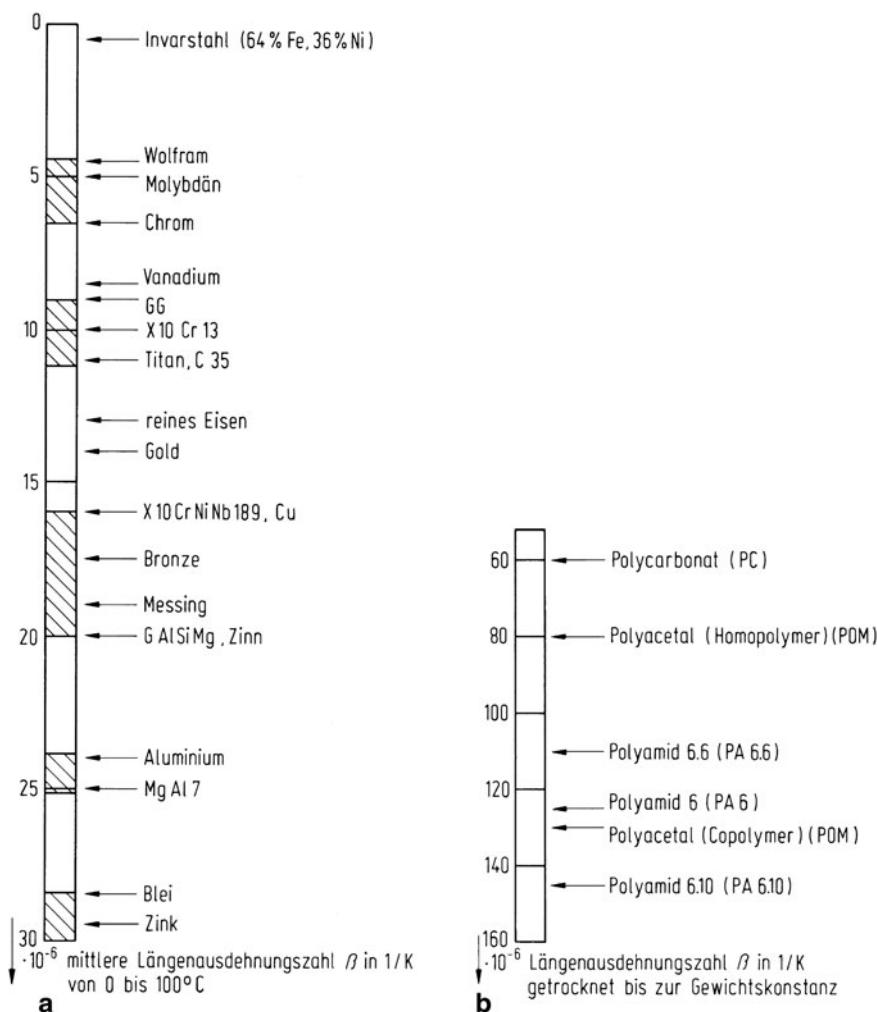
Die Längenausdehnungszahl beschreibt die Ausdehnung in einer Koordinatenrichtung des festen Körpers, während die Raumausdehnungszahl, die die relative Volumenänderung pro Grad angibt, vornehmlich bei Flüssigkeiten und Gasen angewandt wird und bei festen homogenen Körpern den dreifachen Wert der Längenausdehnungszahl hat. Die Definition der Ausdehnungszahl ist weiterhin als Mittelwert über den jeweils durchlaufenen Temperaturbereich zu verstehen, denn sie ist nicht nur werkstoff- sondern auch temperaturabhängig. Mit höheren Temperaturen nimmt die Ausdehnungszahl im Allgemeinen zu.

Die Übersicht in Abb. 13.1 zeigt hinsichtlich der Längenausdehnungszahl deutlich voneinander abgesetzte Gruppen von Konstruktionswerkstoffen. Häufig vorkommende Kombinationen von metallischen Werkstoffen wie ferritisch-perlitischer Stahl, z. B. C 35, mit austenitischem Stahl, z. B. X 10 Cr Ni Nb 189, Grauguss mit Bronze oder mit Aluminium müssen also Ausdehnungen mit fast doppelt so hohen Beträgen untereinander vertragen können. Bei großen Abmessungen kann aber schon der gering erscheinende Unterschied zwischen C 35 und dem 13 %-igen Chromstahl X 10 Cr 13 problematisch werden.

Niedrigschmelzende Metalle wie Aluminium und Magnesium haben größere Ausdehnungszahlen als Metalle mit hohem Schmelzpunkt wie Wolfram, Molybdän und Chrom. Nickel-Legierungen zeigen je nach Nickelgehalt verschiedene große Werte. Sehr niedrige Werte treten im Bereich von 32 bis 40 Gewichtsprozent auf. Hierbei zeigt die 36 %-Ni-Fe-Legierung (als „Invarstahl“ bekannt) die niedrigste Ausdehnung. Kunststoffe haben eine merklich höhere Ausdehnungszahl als Metalle.

## 2. Ausdehnung von Bauteilen

Zur Berechnung der Längenänderung  $\Delta l$  muss die örtliche und zeitliche Temperaturverteilung im Bauteil bekannt sein, aus der erst die jeweilige mittlere Temperaturänderung gegenüber dem Ausgangszustand bestimmt werden kann. Bleibt der Temperaturzustand zeitlich unverändert, z. B. im Beharrungszustand bei einem quasistationären Wärmefluss, spricht man von *stationärer Ausdehnung*. Ändert sich die Temperaturverteilung mit der Zeit, liegt *instationäre*, d. h. zeitlich veränderliche, Ausdehnung vor.



**Abb. 13.1** Mittlere Längenausdehnungszahl für verschiedene Werkstoffe. **a** Metallische Werkstoffe, **b** Kunststoffe

Beschränkt man sich zunächst auf die stationäre Ausdehnung, lassen sich unter Verwendung der Definitionsgleichung für die Längenausdehnungszahl die Einflussgrößen gewinnen, von denen die Ausdehnung der Bauteile abhängt:

$$\Delta l = \beta \cdot l \cdot \Delta \vartheta_m, \quad \Delta \vartheta = \frac{1}{l} \int_0^l \Delta \vartheta(x) \cdot dx,$$

Die für den Konstrukteur interessante Längenänderung  $\Delta l$  ist also

- von der Längenausdehnungszahl  $\beta$ ,
- von der betrachteten Länge  $l$  des Bauteils und
- von der mittleren Temperaturänderung  $\Delta\vartheta_m$  dieser Länge abhängig

und kann entsprechend bestimmt werden.

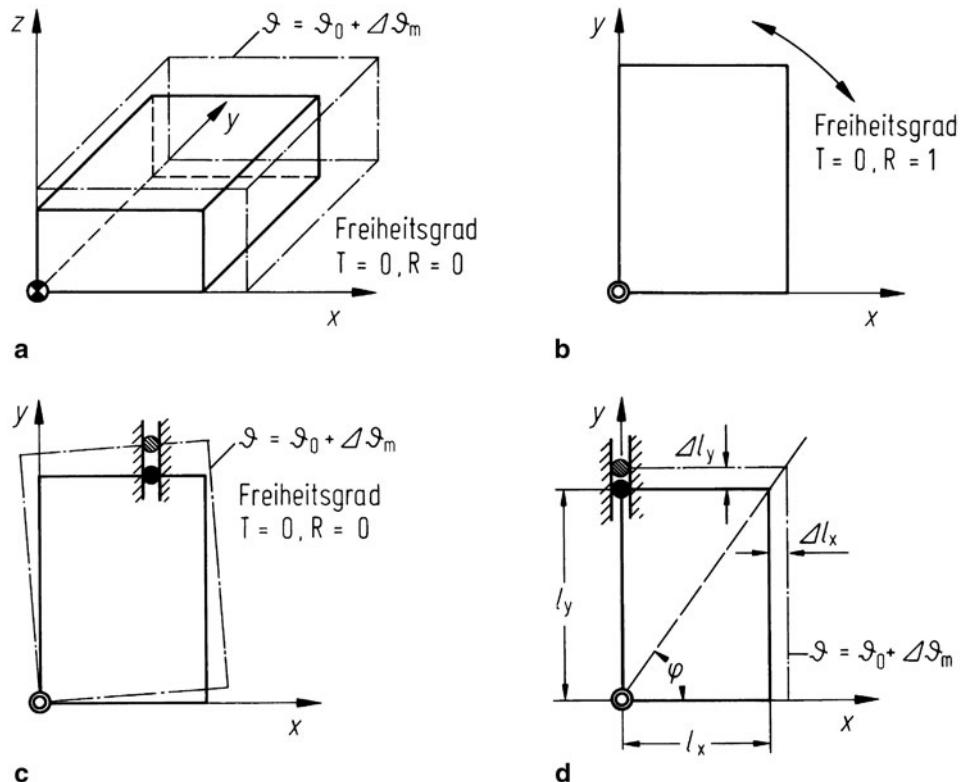
Die so ermittelte Ausdehnung hat Gestaltungsmaßnahmen zur Folge: Jedes Bauteil muss in seiner Lage eindeutig festgelegt werden und darf nur so viele Freiheitsgrade erhalten, wie es zur ordnungsgemäßen Funktionserfüllung benötigt. Im Allgemeinen bestimmt man einen Festpunkt und ordnet dann für die erwünschten Bewegungsrichtungen Translation und Rotation entsprechende Führungsflächen mit Hilfe von Gleitbahnen, Gleitsteinen, Lagern usw. an. Ein im Raum schwebender Körper (z. B. Satellit oder Hubschrauber) hat drei Freiheitsgrade der Translation in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung und drei Freiheitsgrade der Rotation um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse. Ein Schub-Drehgelenk (z. B. das Loslager einer Getriebewelle) hat je einen Freiheitsgrad der Translation und Rotation. Ein an einer Stelle eingespannter Körper (z. B. ein Balken oder eine starre Flanschverbindung) hat dagegen keinen Freiheitsgrad. Anordnungen nach solchen Überlegungen sind aber nicht von selbst auch ausdehnungsgerecht, wie nachfolgend gezeigt wird:

Abbildung 13.2a zeigt einen Körper mit einem Festpunkt ohne Freiheitsgrade. Bei Ausdehnung unter Temperatur kann er sich von diesem Festpunkt aus frei in die Koordinatenrichtungen ausdehnen. In Abb. 13.2b sei nun eine Platte betrachtet, die um die  $z$ -Achse drehbar, aber sonst ohne Freiheitsgrade angeschlossen ist. Nach Abb. 13.2c genügt es, an einer beliebigen Stelle, zweckmäßigerweise möglichst weit von der Drehachse entfernt, z. B. mit einer Gleitführung, diesen Freiheitsgrad aufzuheben. Würde diese Platte unter überall gleicher Temperaturerhöhung sich ausdehnen, so müsste sie dabei eine Drehung um die  $z$ -Achse vollführen, denn die Gleitführung liegt nicht in Richtung der Ausdehnung, die sich aus der Längenänderung in  $x$ - und  $y$ -Richtung ergeben würde. Lässt das Führungselement in dieser Anordnung nur eine Translationsbewegung zu und hat es nicht auch noch die Eigenschaft, als Gelenk zu wirken, dann würde es zu Klemmungen in der Führung kommen. Mit einer Anordnung der Führung in eine der Koordinatenrichtungen (s. Abb. 13.2d) lässt sich die Drehung des Bauteils vermeiden.

Die Verformung unter Wärmeausdehnung ergibt nur dann geometrisch ähnliche Verformungsbilder, wenn die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- Der Ausdehnungskoeffizient  $\beta$  muss in einem Bauteil überall gleich sein (Isotropie), was praktisch vorausgesetzt werden kann, sofern gleiche Werkstoffe und nicht zu große Temperaturunterschiede vorliegen,
- die Dehnungsbeträge  $\varepsilon$  in den Koordinatenrichtungen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  müssen der Abhängigkeit

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \beta \cdot \Delta\vartheta_m$$



**Abb. 13.2** Ausdehnung unter örtlich gleicher Temperaturverteilung; *ausgezogene Linie* Ausgangszustand, *strichpunktierte Linie* Zustand mit höherer Temperatur. **a** Am Festpunkt eingespannter Körper, **b** Platte um  $z$ -Achse drehbar, sonst kein Freiheitsgrad, **c** Platte nach **b** ohne Freiheitsgrad infolge zusätzlichem Schub-Drehgelenk, **d** Platte nach **b** ohne Freiheitsgrad infolge zusätzlichem Schub-Drehgelenk ausdehnungsgerecht angeordnet, ohne eine Plattendrehung zu bewirken. Reine Schubführung wäre anwendbar, die aber auch auf  $x$ -Achse oder auf einem Strahl durch  $z$ -Achse mit Neigung  $\tan\varphi = l_y/l_x$  angeordnet sein könnte

folgen (Melan und Parkus 1953). Da  $\beta$  in einem Bauteil als konstant angesehen werden kann, muss die mittlere Temperaturerhöhung in allen Koordinatenrichtungen gleich bleiben, womit

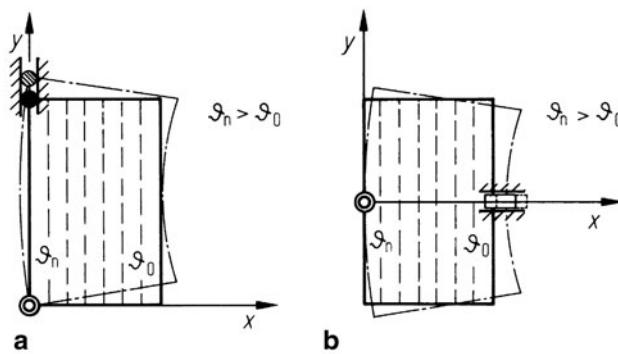
$$\Delta l_x = l_x \cdot \beta \cdot \Delta \vartheta_m,$$

$$\Delta l_y = l_y \cdot \beta \cdot \Delta \vartheta_m$$

$$\Delta l_z = l_z \cdot \beta \cdot \Delta \vartheta_m$$

wird und die Ausdehnung aus zwei Koordinatenrichtungen sich zusammensetzt nach:

$$\tan \psi_x = \frac{\Delta l_y}{\Delta l_x} = \frac{l_y}{l_x},$$



**Abb. 13.3** Ausdehnung unter örtlich veränderlicher, hier in  $x$ -Richtung linear abnehmender Temperaturverteilung. **a** Platte entsprechend Abb. 13.2d, ungleichmäßige Temperaturverteilung bewirkt Verzerrungszustand gemäß *strichpunktierter Linie*, Schub-Drehgelenk nötig, **b** Anordnung der Führung auf der Symmetrielinie des Verzerrungszustands, wodurch reine Schubführung anwendbar ist

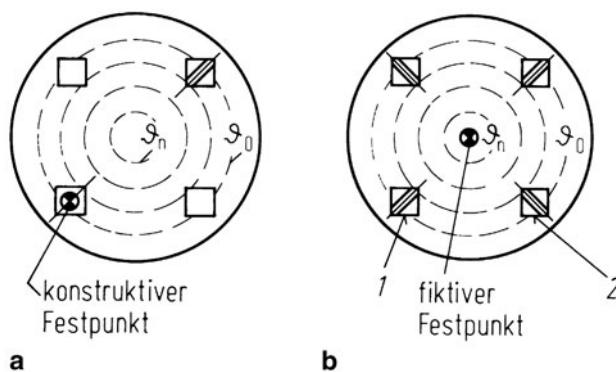
- das Bauteil darf nicht zusätzlichen Wärmespannungen unterliegen, was mindestens der Fall ist, wenn es eine Wärmequelle vollkommen umschließt (Melan und Parkus 1953).

Im Regelfall treten aber im Bauteil unterschiedliche Temperaturen auf. Auch für den einfachen Fall, dass sich die Temperaturverteilung linear über  $x$  ändert (s. Abb. 13.3a), entsteht eine Winkeländerung, die wiederum nur von einer Führung mit Schub-Dreh-Bewegung aufgenommen werden kann. Eine reine Schubführung, also Translationsbewegung mit einem Freiheitsgrad, ist nur anwendbar, wenn die Führungsbahn auf einer Geraden bleibt, die auf der *Symmetrielinie* des Verzerrungszustands gefunden wird, s. Abb. 13.3b. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, muss ein weiterer Freiheitsgrad zugelassen werden.

Somit kann man folgende Regel ableiten:

Führungen, die der Wärmeausdehnung dienen und nur einen Freiheitsgrad haben, müssen auf einem Strahl durch den Festpunkt angeordnet werden, wobei der Strahl *Symmetrielinie* des Verzerrungszustands sein muss. Der Verzerrungszustand kann von lastabhängigen und temperaturabhängigen Spannungen, wie aber auch infolge der Ausdehnung selbst, hervorgerufen werden.

Da Spannungs- und Temperaturverteilung auch von der Form des Bauteils abhängen, ist die *Symmetrielinie* des Verzerrungszustands zunächst auf der *Symmetrielinie* des Bauteils und auf der des aufgeprägten Temperaturfeldes zu suchen. Das Beispiel in Abb. 13.3b zeigt allerdings, dass diese *Symmetrielinie* aus Form und Temperaturverlauf nicht immer leicht erkennbar ist, daher muss der sich schließlich einstellende Verzerrungszustand beachtet werden. Der Verzerrungszustand kann, wie eingangs erwähnt, auch von äußeren Lasten hervorgerufen sein. Insofern gelten die Überlegungen auch für Führungen von Bauteilen, die großen mechanischen Verformungen unterliegen. Ein Beispiel hierzu findet man in Beitz (1969).



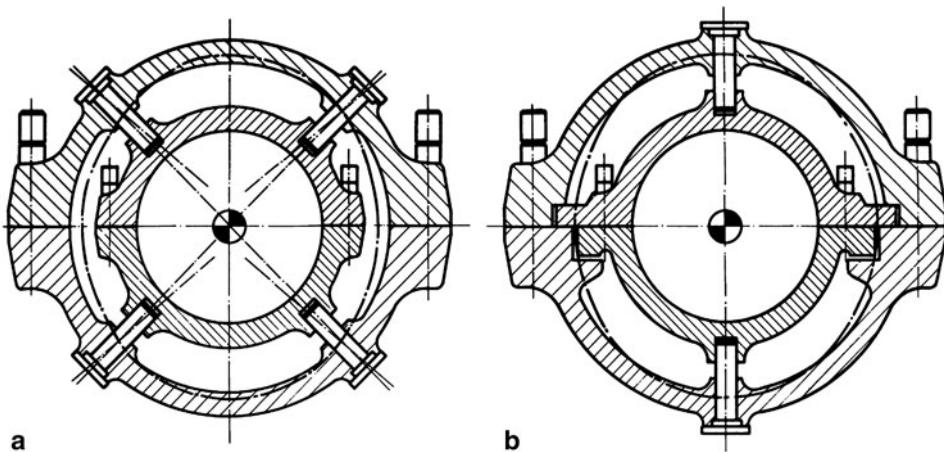
**Abb. 13.4** Draufsicht auf einen Apparat mit von innen nach außen abnehmender Temperatur. Aufstellung auf vier Füßen. **a** Konstruktiver Festpunkt an einem Fuß, reine Schubführung auf einer Geraden, die gleichzeitig Symmetrielinie des Temperaturfeldes ist, **b** fiktiver Festpunkt in der Mitte des Apparats, gebildet durch Schnittpunkt der Ausdehnungsstrahlen

Nachfolgende Beispiele mögen diese Regel noch erläutern: Abbildung 13.4 stellt die Draufsicht auf einen Apparat dar, der eine von innen nach außen abnehmende Temperatur hat. Er ist auf vier Füßen abgestützt. In Abb. 13.4a wurde der Festpunkt an einem der Füße gewählt. Eine klemmfreie Führung ohne Drehung des Apparats ist nur längs der Symmetrielinie des Temperaturfeldes gewährleistet, die Führung muss am gegenüberliegenden Fuß vorgesehen werden. Abbildung 13.4b zeigt eine Möglichkeit, ebenfalls auf den Symmetrielinien Führungen anzurichten, ohne einen Festpunkt konstruktiv vorzusehen. Der Schnittpunkt der Strahlen durch die Führungsrichtungen ergibt einen „fiktiven“ Festpunkt, von dem sich der Behälter nach allen Seiten gleichmäßig ausdehnt. Dabei können theoretisch zwei nicht auf einer Symmetrielinie liegende Führungen (z. B. Führungen 1 und 2) entfallen.

Abbildung 13.5 zeigt die Führung von Innengehäusen in Außengehäusen, wobei die Gehäuse zentrisch zueinander bleiben müssen, ein Problem, wie es z. B. bei Doppelmantelturbinen vorkommt. Dieselbe Aufgabenstellung ergibt sich aber auch im Apparatebau. Sind die Bauteile nicht vollkommen rotationssymmetrisch, so müssen die Führungselemente, wie in Abb. 13.5b vorgesehen, auf den Symmetrielinien angeordnet werden, damit ein Klemmen der Führungen infolge der Ovalverformung der Gehäuse vermieden wird. Die Ovalverformung resultiert aus den unterschiedlichen Temperaturen in der Gehäusewand und im Flansch, besonders während der Erwärmungsphase. Der fiktive Festpunkt liegt auf der Gehäuse- bzw. Wellenachse.

### 3. Relativausdehnung zwischen Bauteilen

Bisher war die Ausdehnung einzelner Elemente für sich behandelt worden. Sehr oft muss aber die relative Ausdehnung zwischen mehreren Bauteilen beachtet werden, besonders dann, wenn eine gegenseitige Verspannung besteht oder aus funktionellen Gründen be-



**Abb. 13.5** Führung von Innengehäusen in Außengehäusen. **a** Anordnung der Führungselemente nicht ausdehnungsgerecht. Ovalverformung der Gehäuse kann Klemmen in den Führungen bewirken, **b** ausdehnungsgerechte Anordnung, Führungen liegen auf Symmetrielinien, Klemmgefahr auch bei Ovalverformung nicht gegeben

stimmte Spiele eingehalten werden müssen. Ändert sich außerdem noch der zeitliche Temperaturverlauf, ergibt sich für den Konstrukteur ein schwieriges Problem.

Die Relativausdehnung zwischen zwei Bauteilen ist

$$\delta_{\text{Rel}} = \beta_1 \cdot l_1 \cdot \Delta\vartheta_{m_1(t)} - \beta_2 \cdot l_2 \cdot \Delta\vartheta_{m_2(t)}.$$

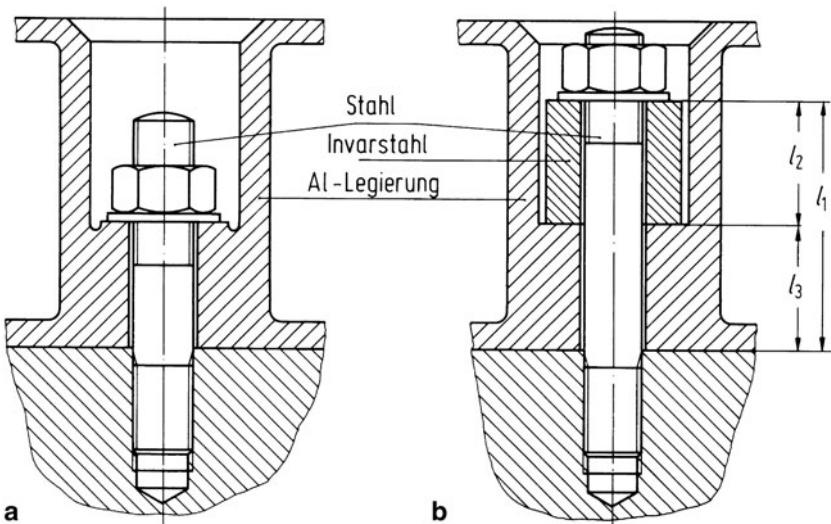
*Stationäre Relativausdehnung* Ist im stationären Fall die jeweilige mittlere Temperaturdifferenz zeitlich unabhängig, konzentrieren sich die Maßnahmen bei gleichen Längenausdehnungszahlen auf ein Angleichen der Temperaturen oder aber bei unterschiedlichen Temperaturen auf ein Anpassen mittels Wahl von Werkstoffen unterschiedlicher Ausdehnungszahlen, wenn die Relativausdehnung klein bleiben muss. Oft ist beides nötig.

Das Beispiel einer Flanschverbindung mittels Stahlschraube und einem Aluminiumflansch nach N.N. (1958) verdeutlicht dies. In Abb. 13.6a ist die Schraube wegen der höheren Ausdehnungszahl des Aluminiums auch bei gleichen Temperaturen höher belastet und damit gefährdet. Abhilfe gewinnt man einerseits durch Vergrößerung der Spannlänge mittels einer Dehnhülse und andererseits durch Aufteilen der Spannlänge in Bauteile unterschiedlicher Längenausdehnung, s. Abb. 13.6b. Soll hier eine Relativausdehnung überhaupt vermieden werden, dann gilt

$$\delta_{\text{Rel}} = 0 = \beta_1 \cdot l_1 \cdot \Delta\vartheta_{m_1} - \beta_3 \cdot l_3 \cdot \Delta\vartheta_{m_3};$$

mit  $l_1 = l_2 + l_3$  und  $\lambda = l_2/l_3$  wird das Längenverhältnis Flansch/Dehnhülse:

$$\lambda = \frac{\beta_3 \cdot \Delta\vartheta_{m_3} - \beta_1 \cdot \Delta\vartheta_{m_1}}{\beta_1 \cdot \Delta\vartheta_{m_1} - \beta_2 \cdot \Delta\vartheta_{m_2}}$$



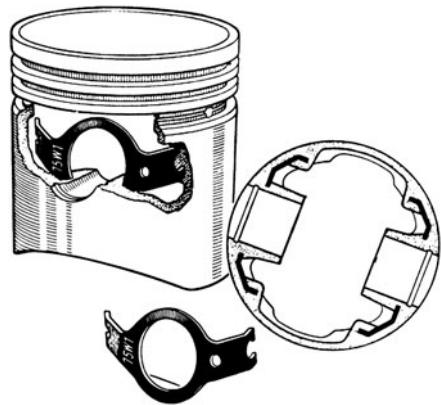
**Abb. 13.6** Verbindung mittels Stahlschraube und Aluminiumflansch nach N.N. (1958). **a** Wegen größerer Ausdehnung des Aluminiumflansches Schraube gefährdet, **b** ausdehnungsgerechte Gestaltung mit Dehnhülse aus Invarstahl mit Ausdehnungszahl nahe Null, die die Ausdehnung des Flansches gegenüber der Schraube ausgleicht

Für den stationären Fall  $\Delta\vartheta_{m_1} = \Delta\vartheta_{m_2} = \Delta\vartheta_{m_3}$  und den gewählten Werkstoffen Stahl ( $\beta_1 = 11 \times 10^{-6}$ ), Invarstahl ( $\beta_2 = 1 \times 10^{-6}$ ) und Al.-Leg. ( $\beta_3 = 20 \times 10^{-6}$ ) wird  $\lambda = l_2/l_3 = 0,9$ , so wie in Abb. 13.6b gewählt.

Bekannt sind die nicht einfachen Ausdehnungsprobleme bei Kolben von Verbrennungskraftmaschinen. Hier ist auch im quasistationären Betrieb die Temperaturverteilung über und längs des Kolbens unterschiedlich. Ferner muss mit verschiedenen Ausdehnungszahlen zwischen Kolben und Zylinder gerechnet werden. Einmal versucht man mittels einer Aluminium-Silizium-Legierung mit relativ geringer Ausdehnungszahl (kleiner als  $20 \times 10^{-6}$ ), und ausdehnungsbehindernden Einlagen, die gleichzeitig gut wärmeleitend sind, sowie mit federnden, also nachgiebigen Kolbenschaftteilen, dem Problem beizukommen. Mit sog. Regelkolben, die mit Stahleinlagen einen Bimetalleffekt erhalten, werden weitere, die Ausdehnung beeinflussende Maßnahmen getroffen (N.N. 1964), s. Abb. 13.7. Eine weitere Möglichkeit ausdehnungsgerechter Kolbengestaltung besteht im Ovalschliff des kalten Kolbenschafts.

Lässt sich dagegen die Werkstoffwahl praktisch nicht beeinflussen, muss mit entsprechender Temperaturangleichung gearbeitet werden. In Großgeneratoren z. B. sind auf großen Längen Kupferleiter in Stahlrotoren isoliert einzubetten. Dabei müssen auch im Hinblick auf die Isolationsbeanspruchung die absoluten und die relativen Ausdehnungen möglichst klein gehalten werden. Hier bleibt nur der Weg, das Temperaturniveau mittels Leiterkühlung möglichst niedrig zu halten (Lambrecht und Scherl 1963; Wanke 1963). Gleichzeitig können bei großen Abmessungen an solchen schnelllaufenden Rotoren sog.

**Abb. 13.7** Regelkolben für Verbrennungsmotor aus Aluminium-Silizium-Legierung mit eingelegter Stahlscheibe, die ausdehnungsbehindernd in Umfangsrichtung wirkt; weiterhin verformt sie infolge des Bimetalleffekts den Kolben so, dass die tragenden Kolbenschaftsteile sich optimal der Zylindergerätefläche anpassen (Bauart Mahle, nach N.N. 1964)



thermische Unwuchten entstehen, wenn die Temperaturverteilung zwar verhältnismäßig gleichmäßig, der Rotor aber wegen seines komplizierten Aufbaus und der verschiedenen Werkstoffe in seinen temperaturabhängigen Eigenschaften sich nicht immer und überall gleich verhält. Mit gezielt eingeführten Kühl- oder Heizmedien beeinflusst man erfolgreich das Ausdehnungsverhalten solcher Bauteile.

*Instationäre Relativausdehnung* Ändert sich der Temperaturverlauf mit der Zeit, z. B. bei Aufheiz- oder Abkühlvorgängen, ergibt sich oft eine Relativausdehnung, die viel größer ist als im stationären Endzustand, weil die Temperaturen in den einzelnen Bauteilen sehr stark unterschiedlich sein können. Für den häufigen Fall, dass es sich um Bauteile gleicher Länge und gleicher Ausdehnungszahl handelt, gilt dann mit

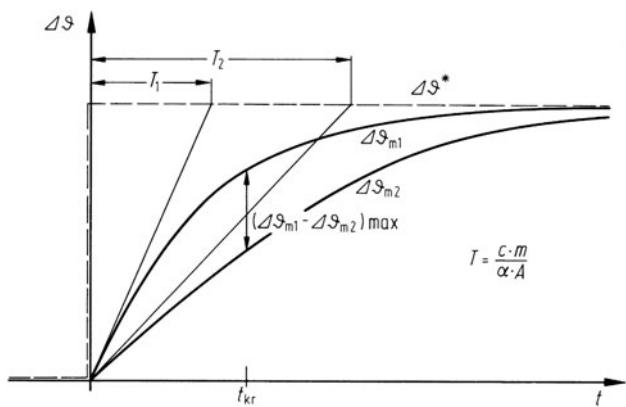
$$\beta_1 = \beta_2 = \beta \text{ und } l_1 = l_2 = l,$$

$$\delta_{\text{Rel}} = \beta \cdot l (\Delta \vartheta_{m_{1(t)}} - \Delta \vartheta_{m_{2(t)}}).$$

Die zeitliche Erwärmung von Bauteilen ist u. a. von Endres und Salm (Endres 1958; Salm und Endres 1958) für verschiedene Aufheizfälle angegeben worden. Gleichgültig, ob man einen Temperatursprung oder einen linearen Verlauf des aufheizenden Mediums annimmt, ist die Erwärmungskurve in ihrem zeitlichen Verlauf durch die sog. Aufheizzeitkonstante charakterisiert. Betrachtet man beispielsweise die Erwärmung  $\Delta \vartheta_m$  eines Bauteils bei einem plötzlichen Temperaturanstieg  $\Delta \vartheta^*$  des aufheizenden Mediums, so ergibt sich unter der allerdings groben Annahme, dass Oberflächen- und mittlere Bauteiltemperatur gleich seien, was praktisch nur für relativ dünne Wanddicken und hohe Wärmeleitzahlen annähernd zutrifft, der in Abb. 13.8 gezeigte Verlauf, der der Beziehung

$$\Delta \vartheta_m = \Delta \vartheta^* (1 - e^{-t/T}).$$

**Abb. 13.8** Zeitliche Temperaturänderung bei einem Temperatursprung  $\Delta\vartheta^*$  des aufheizenden Mediums in zwei Bauteilen mit unterschiedlicher Zeitkonstante



folgt. Hierbei bedeutet  $t$  die Zeit und  $T$  die Zeitkonstante mit

$$T = cm/\alpha A$$

$c$  = spez. Wärme des Bauteilwerkstoffs,

$m$  = Masse des Bauteils,

$\alpha$  = Wärmeübergangszahl an der beheizten Oberfläche des Bauteils,

$A$  = beheizte Oberfläche am Bauteil.

Trotz der genannten Vereinfachung ist der Ansatz für einen grundsätzlichen Hinweis tauglich. Bei unterschiedlichen Zeitkonstanten der Bauteile 1 und 2 ergeben sich verschiedene Temperaturverläufe, die zu einer bestimmten kritischen Zeit eine größte Differenz haben. Dies ist der Temperaturunterschied, der die maximale Relativausdehnung bewirkt. Hier können vorgesehene Spiele überbrückt werden, oder es treten Zwangszustände ein, bei denen z. B. die Streckgrenze überschritten wird. Eine Differenz im Temperaturverlauf wird vermieden, wenn es gelingt, die Zeitkonstanten der beteiligten Bauteile gleichzumachen. Eine Relativausdehnung findet dann nicht statt. Nicht immer wird dieses Ziel erreichbar sein, aber zur Annäherung der Zeitkonstanten, d. h. Verminderung der Relativausdehnung, bieten sich mit  $m = V\rho$

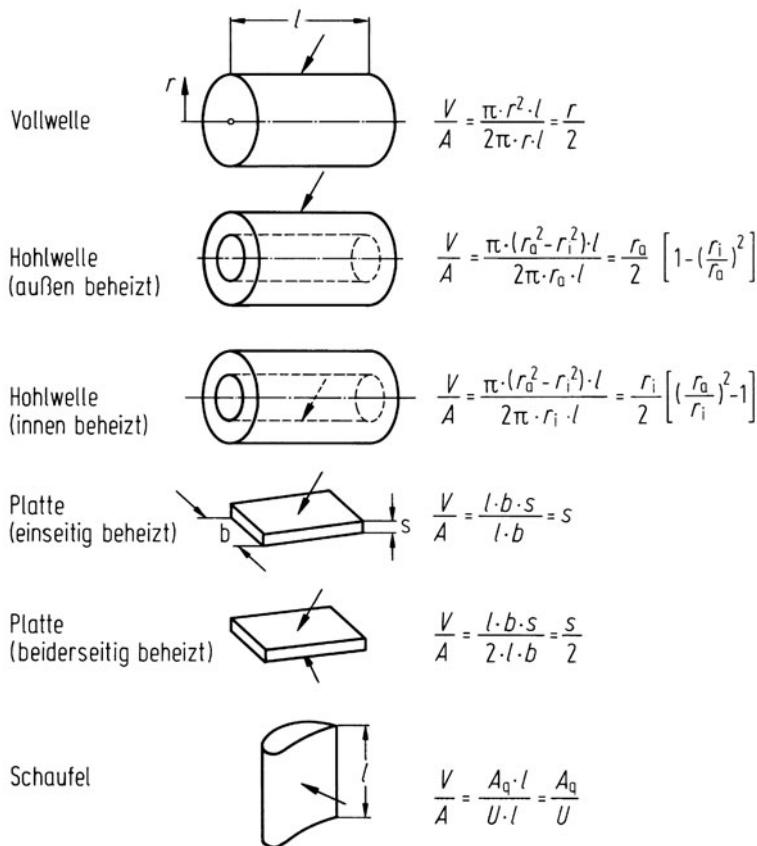
$$T = c \cdot \rho \frac{V}{A} \cdot \frac{1}{\alpha},$$

$V$  = Volumen des Bauteils,

$\rho$  = Dichte des Bauteilwerkstoffs,

konstruktiv zwei Wege an:

- Angleichung der Verhältnisse Volumen zur beheizten Oberfläche:  $V/A$  und
- Korrektur über Beeinflussung der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  mit Hilfe von z. B. Schutzhemden oder anderen Anströmungsgeschwindigkeiten.



**Abb. 13.9** Volumen-Flächen-Verhältnis verschiedener geometrischer Körper; eingesetzt ist jeweils die beheizte Oberfläche

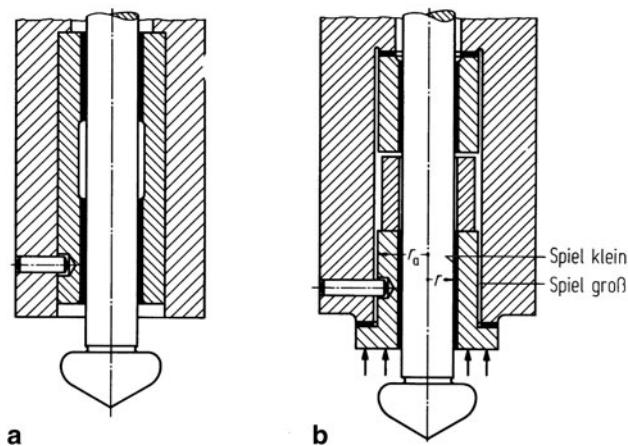
In Abb. 13.9 ist das Verhältnis  $V/A$  für einige einfache, aber oft repräsentative Körper wiedergegeben. Mit entsprechender Abstimmung lässt sich die Relativausdehnung vermindern.

Ein Beispiel hierzu zeigt Abb. 13.10, bei dem es darum geht, eine in Buchsen mit möglichst geringem Spiel geführte Ventilspindel auch bei Temperaturänderung sicher und klemmfrei arbeiten zu lassen. Die im Bildteil a gezeigte Buchse ist im Gehäuse eingepasst und bildet mit ihm so eine Einheit. Bei einer Erwärmung wird sich die Spindel rasch u. a. radial ausdehnen. Die Buchse mit guter Wärmeleitung an das Gehäuse bleibt dagegen länger kalt. Es kommt zu gefährlicher Spielverengung.

Im Bildteil b dichten die Buchsen nur axial ab und können sich radial frei ausdehnen. Sie sind überdies im Volumen-Flächen-Verhältnis so abgestimmt, dass Spindel und Buchsen annähernd gleiche Zeitkonstanten haben. Damit bleibt das Ventilspindelspiel in allen Aufheiz- und Abkühlzuständen annähernd gleich und kann sehr klein gewählt werden.

**Abb. 13.10** Spindelabdichtung von Dampfventilen.

a Feste, eingepresste Buchse erfordert relativ großes Spiel an der Spindel, da nicht ausdehnungsgerecht abgestimmt, b radial bewegliche, axial abdichtende Buchse gestattet kleines Spiel an der Spindel, da Buchse und Spindel auf gleiche Zeitkonstante abgestimmt



Die Ventilspindeloberfläche und die Innenfläche der Buchse werden vom Leckagedampf aufgeheizt, infolgedessen ist

$$\left(\frac{V}{A}\right)_{\text{Spindel}} = \frac{r}{2},$$

$$\left(\frac{V}{A}\right)_{\text{Buchse}} = \frac{(r_a^2 - r_i^2)}{2r_i}$$

mit  $r \approx r_i$  und  $V/A_{\text{Spindel}} = V/A_{\text{Buchse}}$  wird

$$\frac{r}{2} = \frac{(r_a^2 - r^2)}{2r},$$

$$r_a = \sqrt{2} \cdot r.$$

Bekannt sind Maßnahmen, z. B. Wärmeschutzbleche, die die Wärmeübergangszahl am tragenden Bauteil verringern, wodurch eine langsamere, angepasste Erwärmung mit geringerer Relativausdehnung stattfindet.

Die gezeigten Überlegungen haben überall da Bedeutung, wo zeitlich veränderliche Temperaturen auftreten, besonders dann, wenn mit der Relativausdehnung Spielverengungen verbunden sind, die die Funktion beträchtlich gefährden können, z. B. bei Turbomaschinen, Kolbenmaschinen, Rührwerken, Einbauten in warmgehenden Apparaten.

### 13.3 Kriech- und relaxationsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

#### 1. Werkstoffverhalten unter Temperatur

Bei der Gestaltung von Bauteilen unter Temperatur muss neben dem Ausdehnungseffekt das Kriechverhalten der beteiligten Werkstoffe berücksichtigt werden. Es gibt Werkstoffe, die bereits bei Temperaturen unter 100 °C ein ähnliches Verhalten wie metallische Werkstoffe bei hohen Temperaturen zeigen. Beelich (1973) hat hierzu Hinweise im Zusammenhang mit der Werkstoffwahl gegeben, die hier im Wesentlichen wiedergegeben werden.

Technisch gebräuchliche Werkstoffe, sowohl die reinen Metalle als auch deren Legierungen, sind ihrem Aufbau nach vielkristallin und zeigen ein temperaturabhängiges Verhalten. Unterhalb einer *Grenztemperatur* ist dabei die Haltbarkeit des Kristallverbands im Wesentlichen zeitunabhängig. Entsprechend der bei Raumtemperatur geltenden Regel wird bei höheren Temperaturen bis zu dieser Grenztemperatur die Warmstreckgrenze als Werkstoffkennwert für die Auslegung berücksichtigt. Bauteile mit Temperaturen oberhalb der Grenztemperatur werden stark vom zeitabhängigen Verhalten der Werkstoffe bestimmt. Die Werkstoffe erleiden in diesem Bereich unter dem Einfluss von Beanspruchung, Temperatur und Zeit u. a. eine fortschreitende plastische Verformung, die nach einer bestimmten Zeit zum Bruch führen kann. Die sich dabei einstellende zeitabhängige Bruchgrenze liegt sehr viel niedriger als die Warmstreckgrenze aus dem Kurzzeitversuch. Die besprochenen Verhältnisse sind in Abb. 13.11 prinzipiell wiedergegeben. Grenztemperatur und Festigkeitsverlauf sind stark werkstoffabhängig und müssen jeweils beachtet werden. Bei Stählen liegt die Grenztemperatur zwischen 300–400 °C.

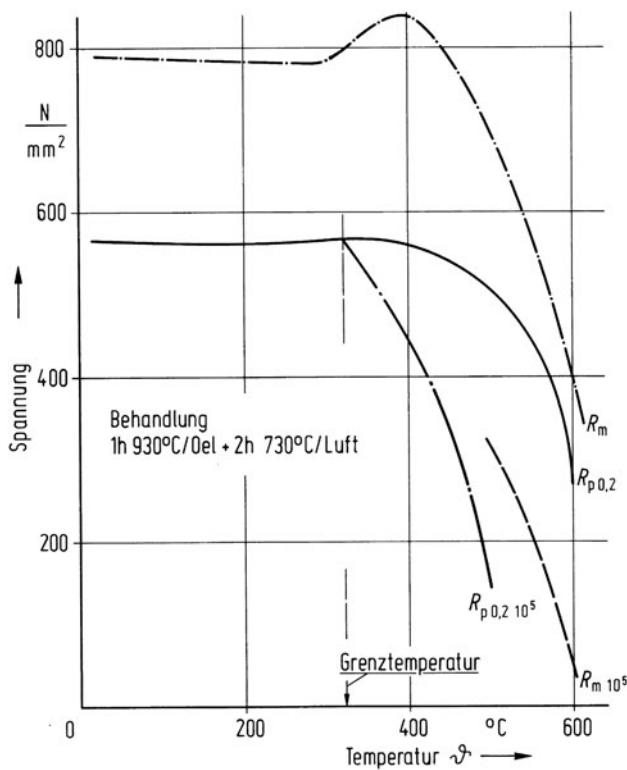
Bei Kunststoffteilen muss der Konstrukteur bereits bei Temperaturen unter +100 °C das viskoelastische Verhalten dieser Werkstoffe berücksichtigen.

Generell ändert sich auch der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur, wobei der höheren Temperatur ein kleinerer Wert zugeordnet ist, s. Abb. 13.12a. Geringste Änderungen zeigen hierbei die Nickellegierungen. Mit dem Absinken des Elastizitätsmoduls sinkt die Steifigkeit der Bauteile. Der Konstrukteur muss diese Erscheinung besonders bei Kunststoffbauteilen beachten. Er muss die Temperatur kennen, bei der der Elastizitätsmodul plötzlich auf relativ niedrige Werte absinkt.

#### 2. Kriechen

Bauteile, die bei hohen Temperaturen oder nahe der Fließgrenze lange Zeit beansprucht werden, erleiden zusätzlich zu der aus dem Hookeschen Gesetz resultierenden elastischen Dehnung  $\varepsilon = \sigma/E$  abhängig von der Zeit plastische Verformungen  $\varepsilon_{\text{plast}}$ . Diese als *Kriechen* bezeichnete Eigenschaft der Werkstoffe ist von der aufgebrachten Beanspruchung, der wirkenden Temperatur und von der Zeit abhängig. Man spricht vom „Kriechen“ der Werkstoffe, wenn die Dehnungszunahme der Bauteile entweder unter konstanter Last oder unter

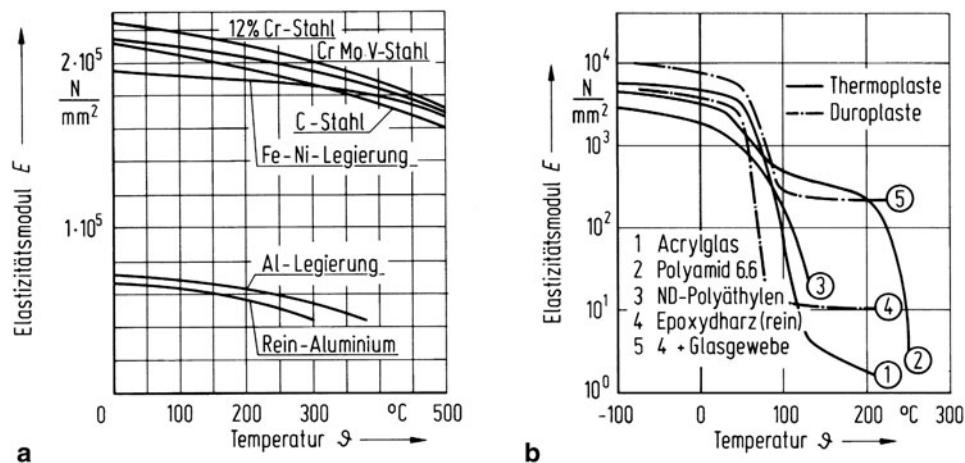
**Abb. 13.11** Kennwerte aus dem Warmzug- und Zeitstandversuch, ermittelt mit dem Stahl 21 Cr Mo V 511 (Werkstoff-Nr. 1.8070) bei verschiedenen Temperaturen; Grenztemperatur als Schnittpunkt der Kurven der 0,2-Dehngrenze und der 0,2-Zeitdehngrenze



Spannung auftritt (Beelich 1973). Die zur Werkstoffbeurteilung ermittelten Kriechkurven sind bekannt (Florin und Imgrund 1970; Hüskes und Schmidt 1972).

*Kriechen bei Raumtemperatur* Für eine zweckmäßige Auslegung von Bauteilen in der Nähe der Fließgrenze ist die Kenntnis des Werkstoffverhaltens im Übergangsgebiet vom elastischen in den plastischen Zustand wichtig (Hüskes und Schmidt 1972). Bei lang anhaltender statischer Beanspruchung in diesem Übergangsgebiet muss mit Kriecherscheinungen auch unter Raumtemperatur bei metallischen Werkstoffen gerechnet werden. Das Kriechen verläuft dabei nach dem Gesetz des primären Kriechens, s. Abb. 13.13. Die relativ geringen plastischen Formänderungen sind nur im Hinblick auf die Formbeständigkeit eines Bauteils interessant. Im Allgemeinen kriechen aber Stähle im Bereich  $\leq 0,75R_{p0,2}$  oder  $\leq 0,55R_m$  wenig, während bei Kunststoffen eine zuverlässige Beurteilung des mechanischen Verhaltens nur anhand von temperatur- und zeitabhängigen Kennwerten getroffen werden kann.

*Kriechen unterhalb der Grenztemperatur* Bisherige Untersuchungen (Hüskes und Schmidt 1972; Keil et al. 1971) mit metallischen Werkstoffen bestätigen, dass im Normalfall die übliche Rechnung mit der Warmstreckgrenze als obere zulässige Spannung bei kurzzeitigen



**Abb. 13.12** Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe und der Temperatur. **a** Metallische Werkstoffe, **b** Kunststoffe

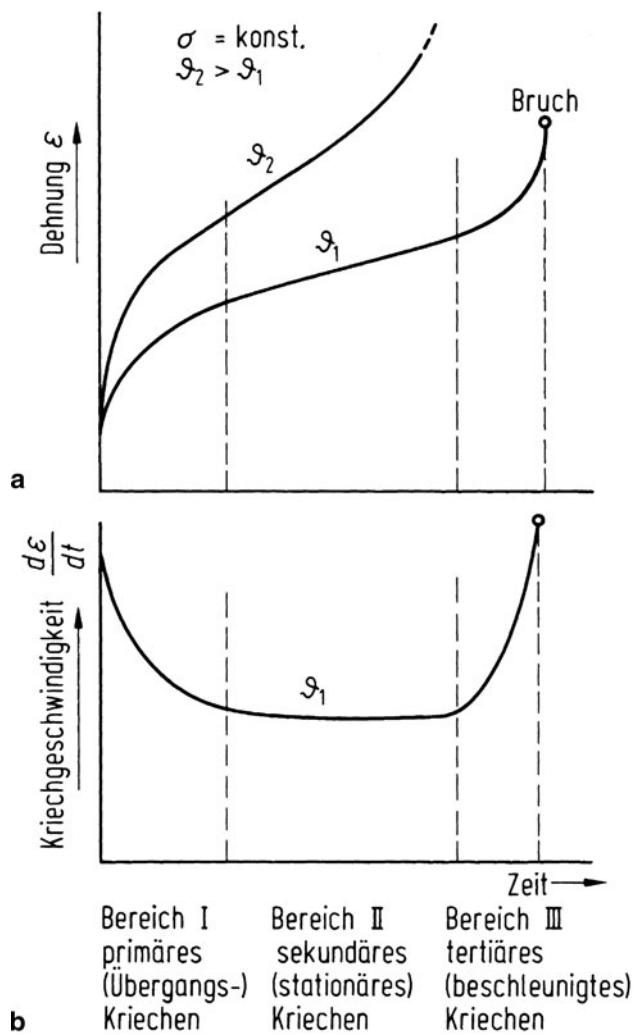
Belastungen, instationären Vorgängen, vorübergehenden thermischen Zusatzspannungen und Störungsfällen bis zur definierten Grenztemperatur ausreichend ist.

Bei Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Formbeständigkeit müssen jedoch auch für mäßig erhöhte Temperaturen die Werkstoffkennwerte des Zeitstandversuchs beachtet werden. Unlegierte und niedriglegierte Kesselbaustähle, aber auch austenitische Stähle weisen je nach Betriebsdauer und Anwendungstemperatur mehr oder weniger große Kriechdehnungen auf.

Bei Kunststoffen finden auch schon bei leicht erhöhten Temperaturen Strukturumwandlungen statt. Diese Umwandlungen haben eine mitunter erhebliche Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Eigenschaften zur Folge, wie man sie bei metallischen Werkstoffen in demselben Temperaturbereich nicht kennt. Sie führen als sog. thermische Alterung zu irreversiblen Änderungen der physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen (Abfall der Festigkeit) (Knappe 1969; Menges und Taprogge 1970).

*Kriechen oberhalb der Grenztemperatur* In diesem Temperaturbereich lösen bei metallischen Werkstoffen mechanische Beanspruchungen auch weit unterhalb der Warmstreckengrenze je nach Werkstoffart laufende Verformungen aus: Der Werkstoff kriecht. Dieses Kriechen bewirkt eine allmähliche Verformung der Konstruktionsteile und führt bei entsprechender Beanspruchung und Zeit zum Bruch oder zu Funktionsstörungen. Im Allgemeinen lässt sich der Vorgang in drei Kriechphasen aufteilen (Hüskes und Schmidt 1972; Keil et al. 1971), s. Abb. 13.13. Für temperaturbeaufschlagte Bauteile ist es wichtig zu wissen, dass der Beginn des tertiären Kriechbereichs als gefährlich anzusehen ist. Der Tertiärbereich beginnt im Allgemeinen bei etwa 1 % bleibender Dehnung. Für einen Überblick

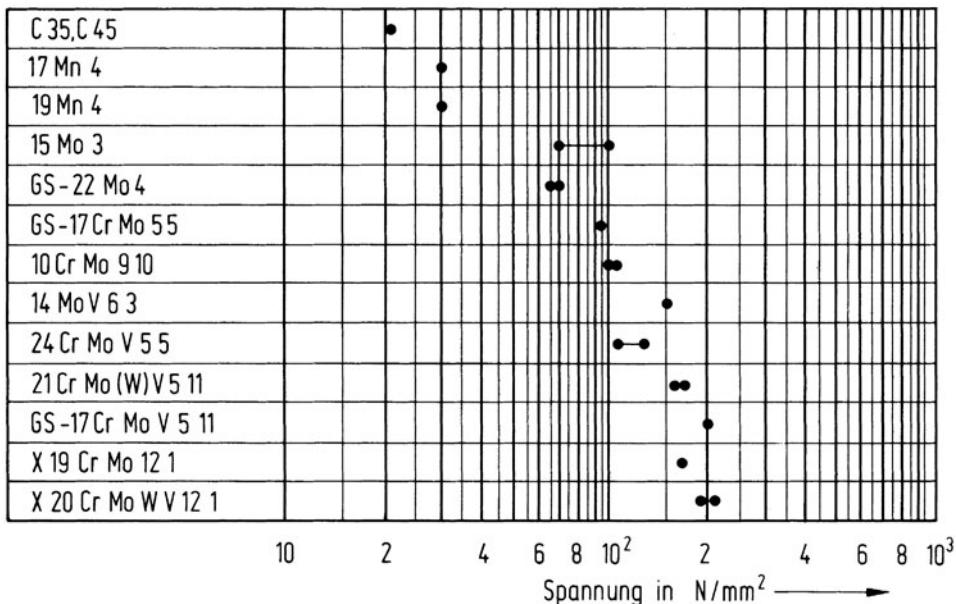
**Abb. 13.13** Änderung von Dehnung **a** und Kriechgeschwindigkeit **b** mit der Beanspruchungsdauer (schematisch), Kennzeichnung der Kriechphasen



sind für verschiedene Stahlwerkstoffe die  $10^5$ -Zeitdehngrenzen  $\sigma_{1\%/10}^5$  für  $\vartheta = 500^\circ\text{C}$  in Abb. 13.14 zusammengestellt.

### 3. Relaxation

In verspannten Systemen (Federn, Schrauben, Spannrähten, Schrumpfverbänden) ist mit der notwendigen Vorspannung eine Gesamtdehnung  $\vartheta_{\text{ges}}$  (Gesamtverlängerung  $\Delta l_{\text{ges}}$ ) aufgebracht worden. Durch Kriechen im Werkstoff und durch Setzerscheinungen infolge Fließen an den Auflageflächen und Trennfugen bedingt, wächst im Laufe der Zeit der plastische Verformungsanteil auf Kosten des elastischen Verformungsanteils. Dieser Vorgang der



**Abb. 13.14** Spannungen entsprechend 1 %-Zeitdehgrenze verschiedener Werkstoffe nach  $10^5$  h bei  $500^\circ\text{C}$  (N.N. 1969)

elastischen Dehnungsabnahme bei sonst konstanter Gesamtdehnung wird als „Relaxation“ bezeichnet (Erker und Mayer 1973; Wiegand und Beelich 1968a, b).

Verspannte Bauteile werden meist bei Raumtemperatur auf die erforderliche Vorspannkraft gebracht. Bedingt durch die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls (s. Abb. 13.12) wird bei höheren Temperaturen diese Vorspannkraft vermindert, ohne dass eine Längenänderung im verspannten System auftritt.

Die, wenn auch verminderte, Vorspannkraft führt mit dem Erreichen des Betriebszustands bei hohen Temperaturen zum Kriechen des Werkstoffs und damit zu einem weiteren Verlust der Vorspannkraft (Relaxation). Auf die Höhe der verbleibenden Restklemmkraft wirken sich außerdem fertigungs- und betriebsbedingte Parameter aus, z. B. die Höhe der Montage-Vorspannkraft, die konstruktive Gestaltung des verspannten Systems, die Art der einander berührenden Oberflächen, der Einfluss überlagerter Beanspruchungen (normal oder tangential zur Oberfläche). Aufgrund von Untersuchungen (Erker und Mayer 1973; Wiegand und Beelich 1968a, b) über das Relaxationsverhalten von Schrauben-Flansch-Verbindungen ergeben sich plastische Verformungen auch an Trennfugen und Auflageflächen (Setzen) und im Gewinde (Kriechen und Setzen).

Zusammenfassend ist für Bauteile aus metallischen Werkstoffen festzustellen:

- Der Vorspannkraftverlust ist abhängig von den Steifigkeitsverhältnissen in den miteinander verspannten Teilen. Je starrer die Verbindung ausgeführt wird, umso mehr

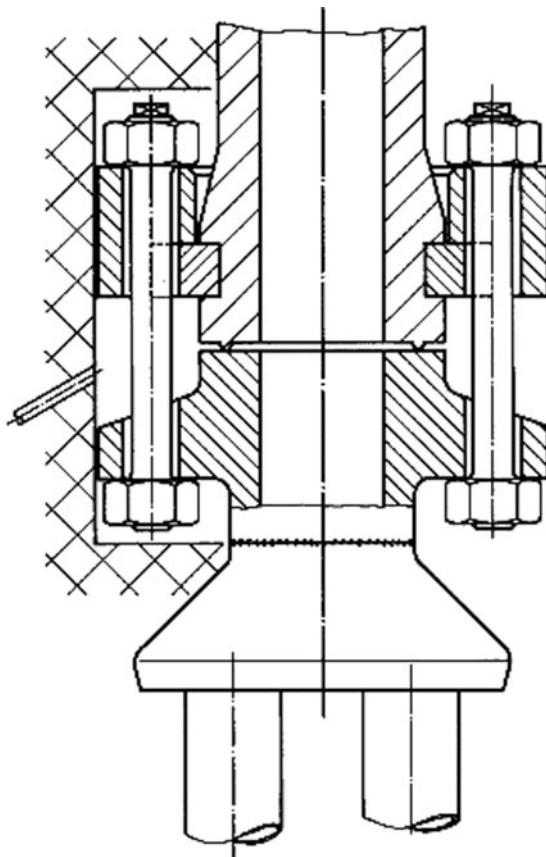
bewirken die plastischen Verformungen (Kriechen und Setzen) einen beträchtlichen Vorspannkraftverlust.

- Obwohl bereits beim Anziehen von Schrauben-Flansch-Verbindungen oder beim Fügen einer Querpressverbindung erhebliche Setzbeträge ausgeglichen werden können, sind bei der Gestaltung möglichst wenige, aber gut bearbeitete Oberflächen (Trennfugen, Auflageflächen) vorzusehen.
- Für jeden Werkstoff ist eine Anwendungsgrenze bezüglich der Temperatur zu berücksichtigen, über deren Wert hinaus seine Verwendung nicht mehr sinnvoll erscheint, weil oberhalb dieser Temperatur die Kriechneigung stark zunimmt. Außerdem sind für den gewünschten Anwendungsfall diejenigen Werkstoffe auszuwählen, bei denen infolge der Verspannung die Warmfließgrenze auch bei überlagerter Betriebsbeanspruchung nicht erreicht wird.
- Innerhalb kurzer Zeit verbleiben bei hohen Anfangsvorspannkräften (Anfangsklemmkräften) auch höhere Restklemmkräfte. Mit zunehmender Betriebsdauer werden die Restklemmkräfte relativ unabhängig von der Anfangsvorspannkraft, indem sie sich einem relativ niedrigen gemeinsamen Niveau nähern.
- Ein Nachziehen von Fügeverbindungen, die bereits einer Relaxation unterworfen waren, ist bei Beachtung der verbliebenen Zähigkeitseigenschaft des Werkstoffs möglich. In der Regel dürfen Kriechbeträge von etwa 1 %, die in den tertiären Kriechbereich führen, nicht überschritten werden.
- Werden Verbindungen zusätzlich zur statischen Vorspannkraft einer schwingenden Beanspruchung unterworfen, so haben Versuche gezeigt, dass die ohne Bruch ertragenen Schwingungsamplituden bei relaxationsbedingtem Abfall der Mittelspannungen erheblich größer sind als die Schwingungsamplituden mit konstanter Mittelspannung. Allerdings führt der relaxationsbedingte Abfall der Mittelspannung nach entsprechender Zeit oft zu einem Lockern der Verbindung.

Bei Anwendung von *Schraubenverbindungen aus Kunststoff* bestimmen zunächst geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen metallkorrodierende Medien, hohe mechanische Dämpfung, geringes spezifisches Gewicht u. a. ihre Auslegung. Zusätzlich müssen diese Verbindungen aber auch gewisse Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften aufweisen. Durch Relaxation bedingte Vorspannkraftverluste müssen besonders in diesen Anwendungsfällen beachtet werden, damit die Funktion derartiger Verbindungen gewährleistet ist. Nach Untersuchungen (Müller 1970, 1966) kann im Vergleich zu metallischen Werkstoffen Folgendes festgestellt werden:

- Die über der Zeit verbleibende Vorspannkraft wird bei Raumtemperatur vom Werkstoff selbst und dessen Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme bestimmt und
- ständiger Wechsel von Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe wirkt sich besonders ungünstig aus.

**Abb. 13.15** Austenit-Ferrit-Flanschverbindung für eine Betriebstemperatur von 600 °C (nach Steinack und Veenhoff 1960)



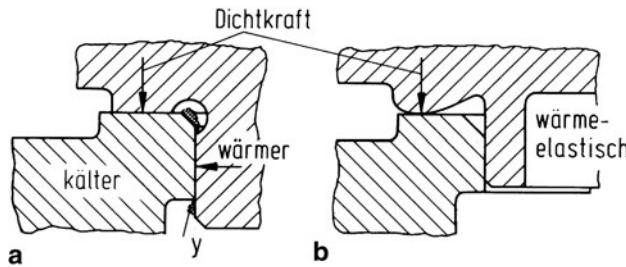
#### 4. Konstruktive Maßnahmen

Für Anlagen unter Zeitbeanspruchung werden zunehmend längere Lebensdauern gefordert, die sich konstruktiv nur realisieren lassen, wenn das Werkstoffverhalten über die volle Beanspruchungsdauer bekannt ist oder mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Nach Hüskes und Schmidt (1972) ist jedoch eine Extrapolation schon dann gefährlich, wenn aus Kurzzeitwerten Richtwerte für die Auslegung bei Beanspruchungsdauern von 10<sup>5</sup> h oder mehr zu geben sind.

Nicht bei allen Bauteilen kann man die thermische Beanspruchung mit besonders hochlegierten Werkstoffen abfangen. Konstruktive Abhilfen sind oft zweckmäßiger, als den Werkstoff zu verändern.

Die Gestaltung ist so zu wählen, dass das Kriechen in bestimmten zulässigen Grenzen bleibt, was erreicht werden kann durch:

- hohe elastische Dehnungsreserve, die Zusatzbeanspruchungen aus Temperaturänderungen klein hält, Beispiel s. Abb. 13.15,



**Abb. 13.16** Zentrierung und Dichtung eines Flanschdeckels nach Pahl (1963). **a** Demontage behindert, weil der Werkstoff in Hinterdrehungen kriecht, **b** ballige Dichtleiste erzeugt bessere Dichtwirkung bei kleineren Anpresskräften, Kriechen behindert wegen günstigerer Gestaltung die Demontage nicht

- Vermeiden von Massenanhäufungen, die bei instationären Vorgängen zu erhöhten Wärmespannungen führen,
- Verhindern, dass der Werkstoff in unerwünschte Richtungen kriecht, wodurch Funktionsstörungen (z. B. Klemmen von Ventilspindeln) oder Demontageschwierigkeiten entstehen können, Beispiel s. Abb. 13.16.

Bei der Ausführung a des Flanschdeckels nach Abb. 13.16 kriecht der Werkstoff in die Hinterdrehung. Der sich schneller erwärmende Deckel zwängt in der Zentrierung und kriecht ebenso an der Stelle y. Die Ausführung b des Flanschdeckels ist besser gestaltet, da trotz Kriechens immer noch eine Demontage ohne Beschädigung möglich ist. Wegen der inneren Ausdrehung kann der Deckel außerdem keine nennenswerte radiale Kraft auf die Zentrierung ausüben.

Daraus ergibt sich: Das bei einer Demontage zuerst bewegte Teil muss in Demontagerichtung vorstehen oder entgegen der Demontagerichtung zurückstehen (Pahl 1963).

---

### 13.4 Korrosionsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Nach DIN EN ISO 8044 (DIN 8044) handelt es sich bei Korrosion um eine Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann. Der Begriff der „Korrosion“ ist hier also an eine Schädigung des korrodierten Systems oder Komponenten von diesem gebunden. Liegt keine Schädigung oder Beeinträchtigung vor, so wird in diesem Sinne nicht von Korrosion gesprochen.

Mit dieser Definition gewinnt der Funktionsbegriff noch einmal an Bedeutung. Wird bei einer Maschine die Funktion durch eine Korrosion von Bauteilen nicht beeinträchtigt, so liegt nach der DIN keine Korrosion vor.

Korrosionserscheinungen lassen sich in vielen Fällen nicht vermeiden, sondern nur mindern. Häufig kann die Ursache der Korrosion nicht beseitigt werden, da ein Produkt in feuchter Umgebung und in Meeresnähe betrieben wird. Die Verwendung korrosionsbeständiger Werkstoffe ist in den meisten Fällen unwirtschaftlich. Diese Werkstoffe mit entsprechend hohem Chromanteil sind teuer und lassen sich schlecht bearbeiten. Deshalb erscheint eine „korrosionsverträgliche“ Konstruktion in den meisten Fällen sinnvoller als eine „korrosionsfreie“. Sind aus funktionaler Sicht Bauteile einer Maschine hinsichtlich der Korrosion kritisch, so sollten als Maßnahmen zum einen deren einfache Inspektion und Beurteilung möglich sein. Darüber hinaus sollten dann solche „Verschleißbauteile“ gezielt korrosionsschützt werden, z. B. durch entsprechende Werkstoffe, und einfach austauschbar sein.

## 1. Ursachen und Erscheinungen

Während trockene Umgebung und höhere Temperaturen die chemische Korrosionsbeständigkeit durch Bildung von festhaftenden Metalloxidschichten im Allgemeinen erhöhen, bilden sich unterhalb des Taupunkts mehr oder weniger schwach saure oder basische Elektrolyte, die in der Regel eine elektrochemische Korrosion bewirken (Spähn und Fäßler 1972). Korrosionsfördernd wirkt der Umstand, dass jedes Bauteil unterschiedliche Oberflächen hat, z. B. infolge edlerer oder unedlerer Einschlüsse, verschiedener Gefügeausbildungen, Eigenspannungen u. a. durch Kaltumformung, Wärmebehandlung und Schweißen. Auch kann sich in konstruktiv bedingten Spalten eine örtlich unterschiedliche Konzentration des Elektrolyten bilden, so dass Lokalelemente entstehen, ohne dass ausgesprochene Potenzialunterschiede infolge unterschiedlicher Werkstoffe vorhanden sein müssen.

Zum Erkennen von Korrosionsproblemen ist es zweckmäßig zu unterscheiden (DIN 50900-1; Pahl 1981) (s. Abb. 13.17):

- Korrosion freier Oberflächen,
- berührungsabhängige Korrosion,
- beanspruchungsabhängige Korrosion und
- selektive Korrosion im Werkstoff.

Die vom Konstrukteur zu treffenden Maßnahmen hängen von den jeweiligen Ursachen und Erscheinungen ab. Beispiele zu den einzelnen Erscheinungen sind in Abschn. 13.4 und 13.5 zusammengefasst.

## Korrosion freier Oberflächen

Gleichmäßige,  
Flächenkorrosion



Mulden-  
korrosion



Loch-  
korrosion

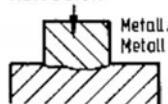


Spaltkorrosion



## Berührungsabhängige Korrosion

Kontakt-  
korrosion



Ablagerungs-  
korrosion



## Beanspruchungsabhängige Korrosion

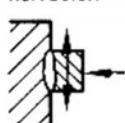
Spannungsriß-  
korrosion



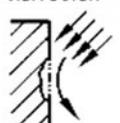
Schwingungsriß-  
korrosion



Reib-  
korrasion



Erosions-  
korrasion



Kavitations-  
korrasion



Flächenpressung  
mit Mikrobewegung

Strömungs-  
reibbeanspruchung

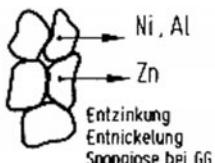
örtliche  
Druckbeanspruchung  
mit Implosion

## Selektive Korrosion im Werkstoff

Interkristalline  
Korrasion



Entzugskorrasion



**Abb. 13.17** Korrosionsarten geordnet nach prinzipiellen Erscheinungen

## 2. Korrosion freier Oberflächen

Bei der Korrosion freier Oberflächen kann gleichmäßige Flächenkorrosion oder örtlich begrenzte Korrosion auftreten. Letztere Korrosionsart ist besonders gefährlich, weil sie im Gegensatz zur ebenmäßig abtragenden eine hohe Kerbwirkung zur Folge hat und in manchen Fällen auch nicht leicht vorhersehbar ist. Daher muss von vornherein auf solchermaßen gefährdete Zonen besonders geachtet werden.

### *Gleichmäßige Flächenkorrosion*

Ursache:

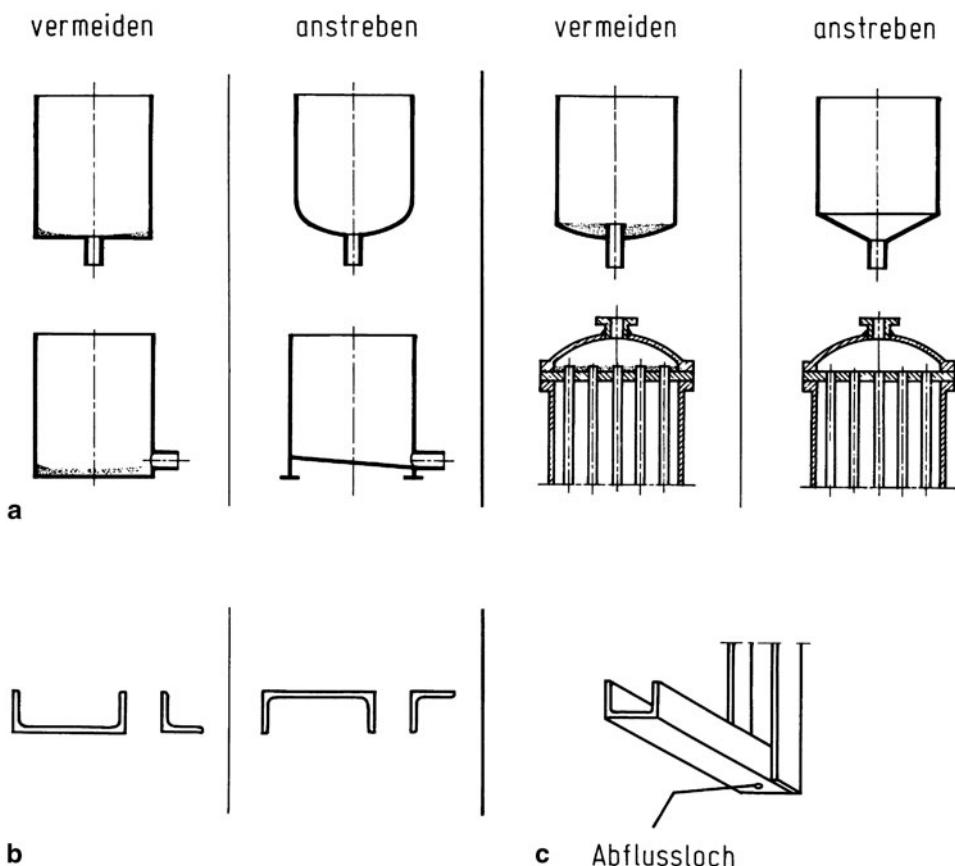
Auftreten von Feuchtigkeit (schwach basischer oder saurer Elektrolyt) unter gleichzeitiger Anwesenheit von Sauerstoff aus der Luft oder dem Medium, insbesondere Taupunktunterschreitung.

Erscheinung:

Weitgehend gleichmäßig abtragende Korrosion an der Oberfläche, bei Stahl z. B. etwa 0,1 mm/Jahr in normaler Atmosphäre. Manchmal auch örtlich stärker, wenn an solchen Stellen infolge Taupunktunterschreitung besonders häufig höherer Feuchtigkeitsgehalt auftritt. Diese gleichmäßig abtragende Korrosion kann infolge höherer Aggressivität des Mediums, höherer Strömungsgeschwindigkeiten und örtlicher Erwärmung verstärkt werden.

Abhilfe:

- ausreichend lange und gleiche Lebensdauer mit entsprechender Wanddickenwahl (Wanddickenzuschlag) und Werkstoffeinsatz,
- Verfahrensführung mit entsprechendem Konzept, das die Korrosion vermeidet bzw. Korrosion wirtschaftlich tragbar macht (vgl. Beispiel 1),
- kleine und glatte Oberflächen anstreben durch entsprechende geometrische Gestalt mit einem Maximum im Verhältnis von Inhalt zu Oberfläche oder z. B. Widerstandsmoment zu Umfang (vgl. Beispiel 2),
- Vermeiden von Feuchtigkeitssammelstellen durch entsprechende Gestaltung, s. Abb. 13.18,
- Vermeiden von Stellen mit Taupunktunterschreitung durch allseits gute Isolierung und Verhinderung von Wärme- bzw. Kältebrücken (vgl. Beispiel 3),
- Vermeiden hoher Strömungsgeschwindigkeiten  $> 2 \text{ m/s}$ ,
- Vermeiden von Zonen hoher und unterschiedlicher Wärmefbelastung bei beheizten Flächen,
- Anbringen eines Korrosionsschutzüberzugs (DIN 50960), auch in Verbindung mit kathodischem Schutz.



**Abb. 13.18** Flüssigkeitsabfluss bei korrosionsbeanspruchten Bauteilen. **a** Korrosionsschutzwidrige und korrosionsschutzgerechte Gestaltung von Böden, **b** ungünstige und günstige Anordnung von Stahlprofilen, **c** Konsole aus U-Profilen mit Wasserabfluss

**Muldenkorrosion** Bei der Muldenkorrosion ergeben sich örtlich unterschiedliche Abtragungsraten.

Ursache:

Es bestehen Korrosionselemente (DIN 50900-2) mit anodischen und kathodischen Bereichen, die unterschiedlichen Korrosionsfortschritt bewirken und im Wesentlichen aus Werkstoffinhomogenitäten, mediumseitig aus unterschiedlichen Konzentrationen oder durch zonenmäßig unterschiedlichen Bedingungen, wie Temperatur, Strahlung usw., herrühren.

Abhilfe:

- Inhomogenitäten und unterschiedliche Bedingungen zu beseitigen versuchen und
- Korrosionsschutzüberzüge flächendeckend aufbringen. Bei Schäden in der Schutzschicht tritt dann allerdings teilweise verstärkte örtliche Korrosion (vgl. Lochkorrosion) auf.

*Lochkorrosion* Bei der Lochkorrosion konzentriert sich der Abtrag auf sehr kleine Oberflächenbereiche mit kraterförmigen oder nadelstichartigen Vertiefungen. Die Tiefe ist in der Regel in der Größenordnung des Durchmessers. Eine Abgrenzung zwischen Mulden- und Lochkorrosion ist in Grenzfällen nicht möglich.

Ursache:

Wie bei Muldenkorrosion. Erscheinung aber örtlich enger begrenzt.

Abhilfe:

Prinzipiell wie bei Muldenkorrosion, insbesondere aber Korrosionsangriff als solchen vermindern oder beseitigen.

### *Spaltkorrosion*

Ursache:

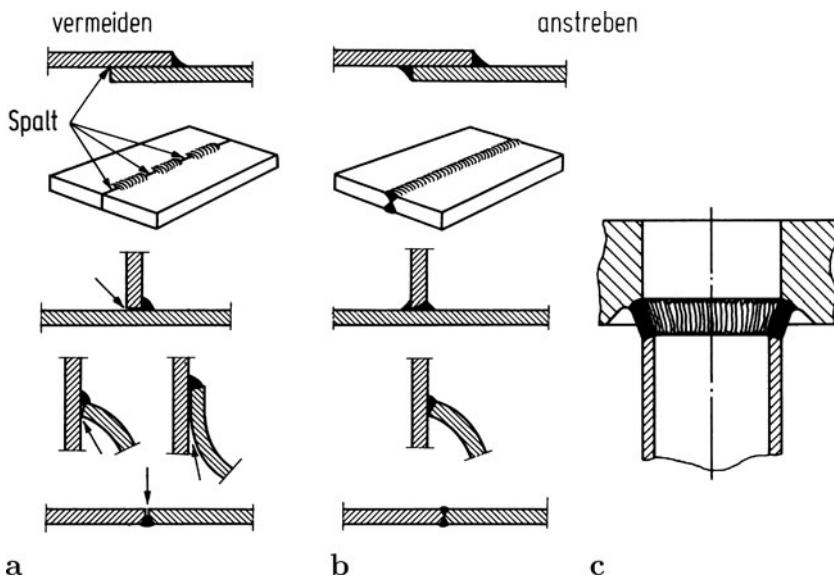
Meist saure Anreicherung des Elektrolyten (Feuchtigkeit, wässriges Medium) infolge Hydrolyse der Korrosionsprodukte in einem Spalt. Bei rost- und säurebeständigen Stählen Abbau der Passivität infolge Sauerstoffverarmung im Spalt. Es handelt sich um Belüftungsmangelkorrosion.

Erscheinung:

Verstärkter Korrosionsabtrag im Spalt an meist nicht sichtbaren Stellen. Vergrößerung der Kerbwirkung an ohnehin höher beanspruchten Stellen. Bruch oder Lösegefahr ohne vorheriges Erkennen.

Abhilfe:

- glatte, spaltlose Oberflächen auch an Übergangsstellen schaffen,
- Schweißnähte ohne verbleibenden Wurzelsspalt vorsehen: Stumpfnähte oder durchgeschweißte Kehlnähte verwenden, s. Abb. 13.19,
- Spalte abdichten, z. B. Steckteile vor Feuchtigkeit durch Muffen oder Überzüge schützen und
- Spalte so groß machen, dass infolge Durchströmung oder Austausch kein Sauerstoffmangel entsteht, d. h. Belüftung ermöglichen.



**Abb. 13.19** Beispiele von Schweißverbindungen. **a** Spaltkorrosionsgefährdet, **b** korrosionsgerechte Gestaltung nach Spähn und Fäßler (1972), **c** spaltfreies Einschweißen von Rohren in einen Rohrboden, wodurch Spalt- und Spannungsrißkorrosion vermieden werden

### 3. Berührungsabhängige Korrosion

#### Kontaktkorrosion

Ursache:

Zwei Metalle mit unterschiedlichem Potenzial stehen durch Paarung oder Festkörper in leitender Verbindung unter gleichzeitiger Anwesenheit eines Elektrolyten, d. h. leitender Flüssigkeit oder Feuchtigkeit (Spähn und Fäßler 1966).

Erscheinung:

Das unedlere Metall korrodiert in der Nähe der Kontaktstelle stärker, und zwar umso mehr, je kleiner die Fläche des unedleren Metalls im Vergleich zu der des edleren ist (galvanische Korrosion). Wiederum wird die Kerbwirkung vergrößert. Die Korrosionsprodukte haben Sekundärwirkungen mannigfacher Art, z. B. Ablagerungen, Fressen, Schlamm, Verunreinigungen der Medien, zur Folge.

Abhilfe:

- Metallkombinationen mit geringem Potenzialunterschied und daher kleinem Kontaktkorrosionsstrom verwenden,

- Einwirkung des Elektrolyten auf die Kontaktstelle verhindern durch örtliches Isolieren zwischen den beiden Metallen,
- Elektrolyt überhaupt vermeiden und
- notfalls gesteuerte Korrosion durch gezielten Abtrag an elektrochemisch noch unedlerem „Fressmaterial“, sog. Opferanoden, vorsehen.

### *Ablagerungskorrosion*

Ursache:

An der Oberfläche oder in Spalten lagern sich Fremdkörper, wie Korrosionsprodukte, Rückstände aus dem geförderten Medium, Eindampfungsprodukte, Dichtungsmaterial usw. ab, die ihrerseits einen Potenzialunterschied an der betreffenden Stelle hervorrufen.

Abhilfe:

- Ablagerungsprodukte vermeiden, herausfiltern oder gezielt sammeln,
- Totwasserzonen konstruktiv vermeiden, gleichmäßige Strömung, nicht zu geringe Geschwindigkeit und selbsttätige Entleerung anstreben (s. Abb. 13.18a) und
- Anlagenteile spülen oder reinigen.

### *Korrosion an Phasengrenzen*

Ursache:

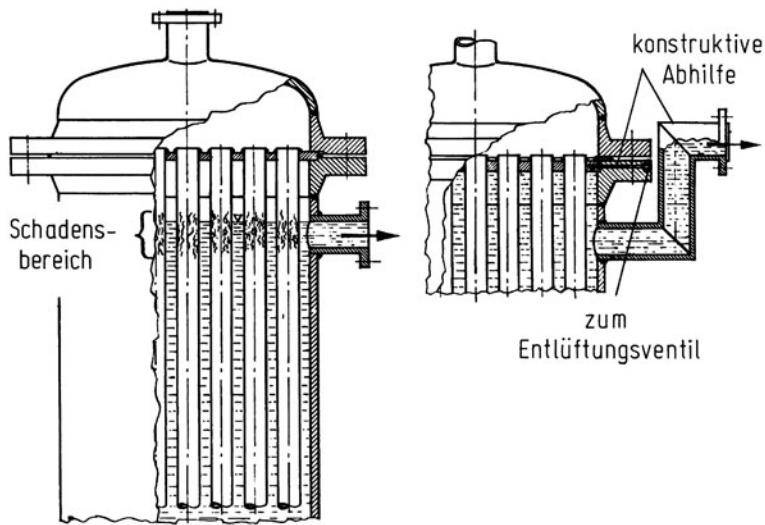
Infolge einer Zustandsänderung des die Metallfläche berührenden Mediums von der flüssigen in die gasförmige Phase und umgekehrt entsteht im Umschlagbereich an metallischen Oberflächen eine erhöhte Korrosionsgefahr. Diese wird u. U. durch Ankrustung im Bereich zwischen flüssiger und gasförmiger Phase verstärkt (Spähn und Fäßler 1972).

Erscheinung:

Die Korrosion ist auf den Umschlagbereich konzentriert und umso stärker, je schroffer der Umschlag stattfindet und je aggressiver das Medium ist (Rubo 1966).

Abhilfe:

- allmähliche Wärmez- bzw. -abfuhr längs einer Heiz- oder Kühlstrecke vorsehen,
- Turbulenz vermindern, d. h. Wärmeübergangszahlen am Einlauf des umschlagenden Mediums vermindern, z. B. Richtbleche, Schutzhemden,
- korrosionsbeständigen Schutzmantel an kritischen Stellen vorsehen (vgl. Beispiel 3 und 4),
- Übergangsbereiche zwischen flüssiger und gasförmiger Phase mit entsprechender Gestaltung vermeiden, s. Abb. 13.20, und
- Flüssigkeitsspiegel schwanken lassen, z. B. durch Röhren.



**Abb. 13.20** Korrosion an der Grenzfläche zwischen Gas- und Flüssigkeitsphase nach Spähn und Fäßler (1972) infolge höherer Konzentration im Bereich der Wasserlinie eines stehend angeordneten Kühlers. Konstruktive Abhilfe durch Höherlegen des Wasserspiegels

#### 4. Beanspruchungsabhängige Korrosion

Korrosionsgefährdete Bauteile unterliegen in der Regel einer mechanischen Beanspruchung in ruhender oder schwingender Form, die entweder durch die inneren Schnittgrößen oder durch Angriffe an der Oberfläche hervorgerufen werden. Solche zusätzlich auftretenden mechanischen Beanspruchungen bedingen eine Reihe gravierender Korrosionserscheinungen.

##### *Schwingungsrisskorrosion*

Ursache:

Korrosiver Angriff auf ein Bauteil, das einer mechanischen Schwingungsbeanspruchung ausgesetzt ist, setzt die Festigkeit stark herab. Es gibt keine Dauerhaltbarkeit. Je höher die mechanische Beanspruchung und je intensiver der korrosive Angriff ist, desto kürzer ist die Lebensdauer.

Erscheinung:

Verformungloser Bruch wie bei einem Dauerbruch, wobei Korrosionsprodukte besonders bei schwach korrodierenden Medien nur mikroskopisch erkennbar sind. Verwechslung mit gewöhnlichem Dauerbruch ist daher oft gegeben.

Abhilfe:

- mechanische oder thermische Wechselbeanspruchung klein halten, besonders Schwingungsbeanspruchung infolge Resonanzerscheinungen vermeiden,
- Spannungsüberhöhung infolge von Kerben vermeiden,
- Druckvorspannung als Eigenspannung durch Kugelstrahlen, Prägepolieren, Nitrieren usw. hilft Lebensdauer erhöhen,
- korrosives Medium (Elektrolyt) fernhalten,
- Oberflächenschutzüberzüge, z. B. Gummierung, Einbrennlackierung, galvanische Überzüge mit Druckspannung, Verzinkung oder Aluminierung vorsehen.

### *Spannungsrisskorrosion*

Ursache:

Bestimmte empfindliche Werkstoffe neigen nach einer gewissen Zeit zu trans- oder interkristalliner Rissbildung, wenn gleichzeitig eine ruhende Zugbeanspruchung aus äußerer Last oder Eigenspannungszustand und ein diese Rissart auslösendes, spezifisches Agens einwirken. Es genügt, eine dieser Voraussetzungen zur Bildung der Spannungsrisskorrosion zu vermeiden.

Erscheinung:

Je nach angreifendem Medium (Spähn und Fäßler 1972) entstehen trans- oder interkristalline Risse, die sehr fein sind und rasch vorwärtschreiten. Dicht danebenliegende Partien bleiben unberührt.

Abhilfe:

- empfindliche Werkstoffe vermeiden, was aber wegen anderer Anforderungen oft nicht möglich ist. Diese Werkstoffe sind: unlegierte Kohlenstoffstähle, austenitische Stähle, Messing, Magnesium- und Aluminiumlegierungen sowie Titanlegierungen,
- Zugspannung an der angegriffenen Oberfläche massiv herabsetzen oder ganz vermeiden,
- Druckspannung in die Oberfläche einbringen, z. B. Schrumpfbandagen, vorgespannte Mehrschalenbauweise, Kugelstrahlen,
- Eigenzugspannungen durch Spannungsarmglühen abbauen,
- kathodisch wirkende Überzüge aufbringen,
- Agenzien vermeiden oder mildern durch Erniedrigung der Konzentration und der Temperatur.

### *Dehnungsinduzierte Korrosion*

Ursache:

Durch wiederholte Dehnungen oder Stauchungen über kritische Beträge hinaus reißt die schützende Deckschicht immer wieder auf.

Erscheinung:

Es ist kein natürlicher Korrosionsschutz mehr gegeben, und dadurch tritt örtliche Korrosion auf.

Abhilfe:

Dehnungs- bzw. Stauchungsbeträge vermindern.

*Erosions- und Kavitationskorrosion* Erosion und Kavitation können von Korrosion begleitet sein, wodurch der Abtragvorgang an der so beanspruchten Stelle beschleunigt wird. Primäre Abhilfe liegt in der Vermeidung bzw. Verminderung der Erosion und Kavitation mit Hilfe strömungstechnischer oder konstruktiver Maßnahmen. Erst wenn dies nicht gelingt, sollten harte Oberflächenüberzüge wie Auftragsschweißungen, Nickelschichten, Hartchrom oder Stellit ins Auge gefasst werden.

*Reibkorrosion*

Ursache:

Reibkorrosion entsteht durch relativ geringe Bewegung unter mehr oder weniger hoher Flächenpressung an gepaarten Oberflächen.

Erscheinung:

Die beanspruchte Oberfläche bildet harte Oxidationsprodukte (sog. Reibrost), die u. U. den Vorgang beschleunigen. Gleichzeitig entsteht erhöhte Kerbwirkung.

Abhilfe:

Die wirksamste Abhilfe ist die Beseitigung der Scheuerbewegung, z. B. durch elastische Aufhängung, hydrostatische Lagerung statt reibender Führung:

- Rohrschwingungen verkleinern durch Verringern der Strömungsgeschwindigkeit im Rohraußenraum und/oder Verändern der Abstände der Leitbleche,
- Spalte zwischen Leitblechen und Rohren vergrößern, so dass keine Berührung mehr stattfindet,
- Wanddicke der Rohre vergrößern, damit sich ihre Steifigkeit und zugleich die zulässige Korrosionsrate erhöhen,
- für die Rohre Werkstoff mit besserer Haftung der Schutzschicht verwenden.

Überhaupt sind Scheuerstellen zu vermeiden. Diese können z. B. durch Wärmedehnungen oder bei schwingenden Rohren an Durchführungen (z. B. Leitblechen) entstehen. Dort kann die oxidische Schutzschicht an den Oberflächen der einander berührenden Teile beschädigt werden. Die freigelegten metallischen Bereiche sind elektrochemisch unedler als die mit Schutzschicht bedeckten. Ist das strömende Medium ein Elektrolyt, werden diese verhältnismäßig kleinen, unedlen Bereiche elektrochemisch abgetragen, falls sich die Schutzschicht nicht regenerieren kann.

*Selektive Korrosion* Bei der selektiven Korrosion werden nur bestimmte Gefügeteile der Werkstoffmatrix betroffen. Bedeutung haben:

- interkristalline Korrosion von nichtrostenden Stählen und Aluminiumlegierungen,
- die sog. Spongiose, bei der in Gusseisen die Eisenbestandteile herausgelöst werden,
- die Entzinkung von Messing.

Ursache:

Manche Gefügebestandteile oder korngrenzennahe Bereiche sind weniger korrosionsbeständig als die Matrix.

Abhilfe:

Eine Abhilfe besteht im Wesentlichen in der geeigneten Wahl von Werkstoffen und deren Verarbeitung, z. B. Schweißverfahren, bei der ein so anfälliges Gefüge vermieden wird. Der Konstrukteur benötigt hier bei Auftreten dieser Korrosionserscheinung den Rat des Werkstofffachmanns.

*Generelle Empfehlungen* Es ist so zu gestalten, dass auch unter Korrosionsangriff eine möglichst lange und gleiche Lebensdauer aller beteiligten Komponenten erreicht wird (Rubo 1966, 1985). Lässt sich diese Forderung mit entsprechender Werkstoffwahl und Auslegung wirtschaftlich nicht erreichen, muss so konstruiert werden, dass die besonders korrosionsgefährdeten Zonen und Bauteile überwacht werden können, z. B. durch Sichtkontrolle, Wanddickenmessung mechanisch oder durch Ultraschall oder/und indirekt durch Anordnung von Korrosionsproben, die nach festgelegter Betriebszeit oder nach Kontrollergebnis ausgewechselt werden können.

Ein sicherheitsgefährdender Zustand infolge Korrosion sollte nicht auftreten dürfen.

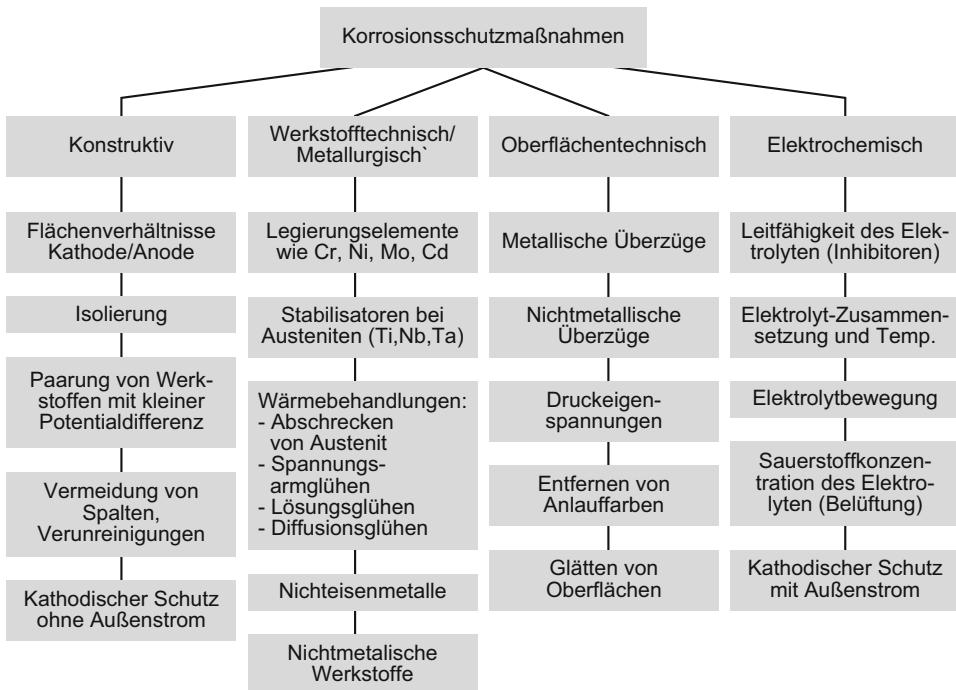
Schließlich sei nochmals auf das Prinzip der Aufgabenteilung aufmerksam gemacht, nach dem auch schwierige Korrosionsprobleme überwunden werden können. Hiernach würde einem Bauteil die Korrosionsabwehr und Abdichtung zufallen, dem anderen die Stütz-, Trag- oder Kraftleitungsaufgabe, wodurch das Zusammentreffen hoher mechanischer Beanspruchung und Korrosionsbeanspruchung vermieden und die Werkstoffwahl jedes Bauteils freier wird (Pahl 1973b).

In Abb. 13.21 sind mögliche Korrosionsschutzmaßnahmen zusammengefasst.

## 5. Beispiele korrosionsgerechter Gestaltung

### Beispiel 1

Mittels Waschlauge lässt sich CO<sub>2</sub> aus einem unter Druck befindlichen Gasgemisch weitgehend entfernen. Die CO<sub>2</sub>-angereicherte Waschlauge wird dann durch Entspannen



**Abb. 13.21** Mögliche Korrosionsschutzmaßnahmen (nach Wiegand 2007)

beträchtlich von CO<sub>2</sub> befreit (regeneriert). Der Ort der Entspannung innerhalb des Ablaufs einer Druckgaswäsche mit Regeneration wird im Allgemeinen nach folgender Überlegung festgelegt:

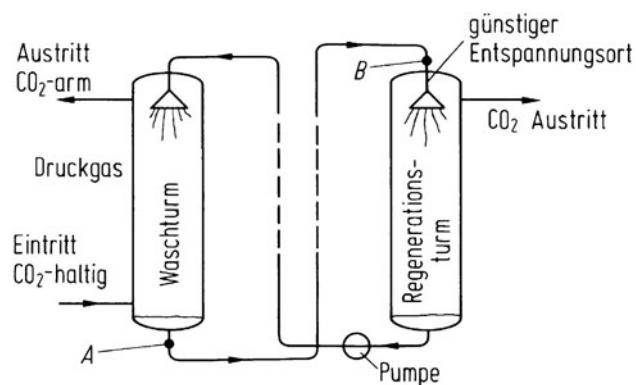
Würde die Waschlauge unmittelbar hinter dem Waschturm entspannt, s. Abb. 13.22, Stelle A, so wäre die anschließende Rohrleitung nach B nach dem sich einstellenden Entspannungsdruck, also mit relativ dünner Wanddicke auszulegen. Man spart also an Wanddicke. Infolge Ausscheidens von CO<sub>2</sub> kann aber die Aggressivität der mit CO<sub>2</sub>-Blasen durchsetzten Lauge derart steigen, dass der für gewöhnlich ausreichende billige unlegierte Stahl der Rohrleitung durch wesentlich teureren rost- und säurebeständigen Werkstoff ersetzt werden müsste. Daher sollte die CO<sub>2</sub>-angereicherte Waschlauge besser bis zum Regenerationsturm, Stelle B, unter Druck verbleiben.

### Beispiel 2

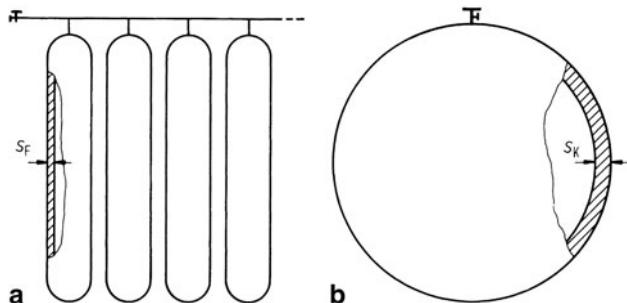
Für die Druckgasspeicherung können nach Abb. 13.23 zwei Lösungen zur Diskussion stehen:

- 30 flaschenförmige Behälter mit je 50 l Inhalt und einer Wanddicke von 6 mm,
- 1 Kugelbehälter mit 1,5 m<sup>3</sup> Inhalt und einer Wanddicke von 30 mm.

**Abb. 13.22** Einfluss des Entspannungsortes einer CO<sub>2</sub>-angereicherten Waschlauge auf die Werkstoffwahl für eine Rohrleitung von A nach B



**Abb. 13.23** Einfluss der Behälterform auf die Korrosionsgefährdung nach Rubo (1966) am Beispiel der Druckgasspeicherung bei 200 bar. **a** In 30 Flaschen mit je 50 l Inhalt, **b** in einer Kugel von 1,5 m<sup>3</sup> Inhalt



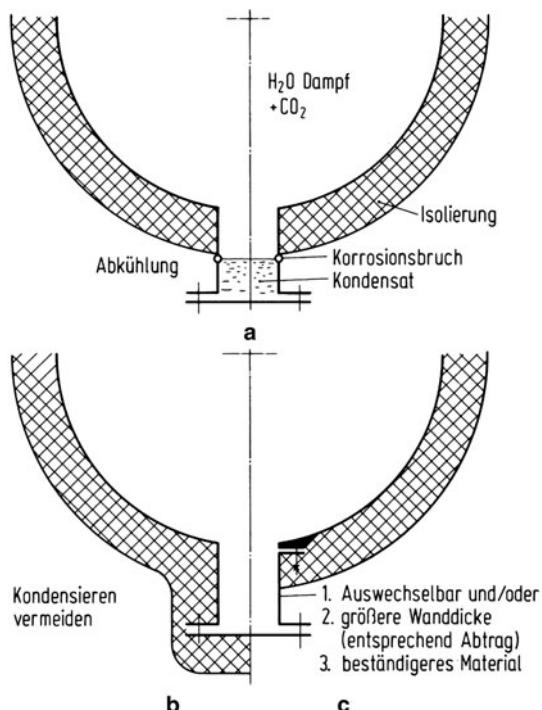
Die Lösung b) ist vom Standpunkt der Korrosion aus aus zwei Gründen vorteilhafter:

- Die der Korrosion unterliegende Oberfläche ist mit etwa 6,4 m<sup>2</sup> rund fünfmal kleiner als bei a). Die Abtragsmenge ist also bei gleicher Abtragtiefe kleiner.
- Bei einer erwarteten Abtragtiefe von 2 mm in 10 Jahren ist der Abtrag festigkeitsmäßig bei a) auf keinen Fall vernachlässigbar bzw. zwingt zu einer wesentlich stärkeren Wand, nämlich 8 mm, während beim Kugelbehälter der Korrosionszuschlag von 2 mm für eine 30 mm dicke Wand fast unerheblich ist. Der Kugelbehälter kann praktisch nur nach Festigkeitsgesichtspunkten ausgelegt werden.

### Beispiel 3

In einem Behälter sei Warmgas mit H<sub>2</sub>O-Dampf enthalten. Abbildung 13.24a zeigt die ursprüngliche Ausführung nach Schraft (1982). Der Ablassstutzen ist nicht isoliert. Infolge Abkühlung bis zur Taupunktunterschreitung bildet sich Kondensat mit stark elektrolytischen Eigenschaften. An der Übergangsstelle zwischen Kondensat und Gas tritt Korrosion auf, die zum Abreißen des Stutzens führen kann. Abbildung 13.24 zeigt

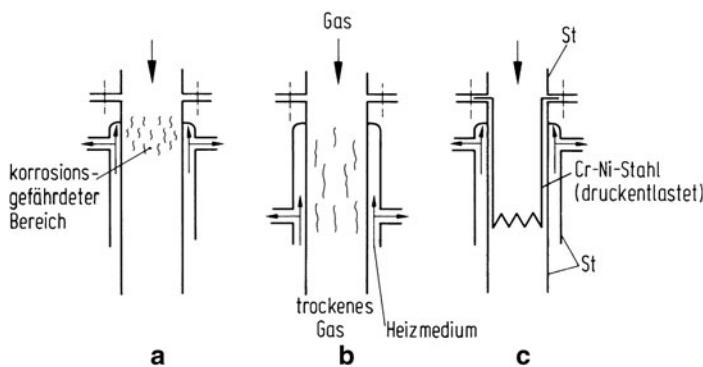
**Abb. 13.24** Ablassstutzen an einem Behälter mit CO<sub>2</sub>-haltigem überhitztem Dampf unter Überdruck.  
**a** Ursprüngliche Ausführung,  
**b** isolierte Ausführung vermeidet Kondensat, **c** andere korrosionsgerechte Varianten mit gesondertem Stutzen



zwei Lösungen: Isolieren einerseits oder gesonderten Stutzen aus beständigem Material andererseits.

#### Beispiel 4

In einem beheizten Rohr, das feuchtes Gas führt, ist der Einlaufbereich am Heizmantel besonders gefährdet, s. Abb. 13.25a. Ein weniger schroffer Übergang (s. Abb. 13.25b) oder ein zusätzlich eingebauter korrosionsbeständiger Schutzmantel (s. Abb. 13.25c) bringen Abhilfe.



**Abb. 13.25** Korrosion an einem beheizten Rohr nach Rubo (1966). **a** Besonders am Einlauf wegen schroffen Übergangs gefährdet, **b** schroffer Übergang vermieden, **c** Schutzmantel deckt kritische Zone ab und mildert Übergang

### 13.5 Verschleißgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

#### 1. Ursachen und Erscheinungen

Ursachen und Erscheinungsformen bei Verschleiß sind außerordentlich vielfältig und komplex. Zur Gewinnung eines tieferen und grundlegenden Verständnisses wird auf die nachstehende Literatur (Czichos und Habig 1992; Habig 1980; Kloos 1973; Simon und Thoma 1985; Wahl 1975) verwiesen. In DIN (50320) sind die Verschleißarten und Verschleißmechanismen definiert. Auftretender Verschleiß bedeutet genauso wie bei Korrosion eine begrenzte Bauteil-Gebrauchsduer, eingeschränkte Funktionseigenschaften, höhere Verluste und weitere Beeinträchtigungen gegenüber dem Neuzustand eines Produktes. Am häufigsten und im Wesentlichen sind folgende Verschleißmechanismen an der Oberfläche und vornehmlich im Mikrobereich wirksam:

**Adhäsionsverschleiß** Ursache ist eine hohe Belastung, unter der atomare Bindungen zwischen dem Grundkörper und dem Gegenkörper gebildet werden. Die Erscheinungen sind Mikroverschweißungen, die unter der Bewegung wieder getrennt werden. Die Oberfläche wird zerstört, abgetragen, und es bilden sich Verschleißpartikel.

**Abrasiver Verschleiß** Ursache sind harte Partikel des Gegenkörpers oder des Zwischenmediums, die zu einer Art Mikrozerspanung der beteiligten Oberfläche führen. Erscheinungen sind Riefen, Rillen und dergleichen in Richtung der wirksamen Bewegung unter Materialabtrag. Sehr milder abrasiver Verschleiß kann zur Oberflächenglättung und -anpassung führen, stärkerer und übermäßiger zu unzulässiger Oberflächenveränderung.

*Verschleiß durch Oberflächenzerrüttung* Ursache ist eine Wechselbeanspruchung im Bereich oberflächennaher Schichten, die zur Zerrüttung führt. Erscheinungen sind Risse, Ausbrüche, Pittings und dergleichen sowie ablösende Partikel.

*Verschleiß durch tribochemische Reaktion* Ursache ist eine chemische Reaktion zwischen Grund- und Gegenkörper unter Mitwirkung von Bestandteilen des Schmierstoffes und/oder der Umgebung infolge einer Aktivierung (Temperaturerhöhung) durch die eingebrachte Reibarbeit. Erscheinungen sind en Veränderung der Oberfläche unter Bildung harter Zonen oder Partikel, wobei letztere wiederum zu vermehrter Verschleißbildung beitragen.

## 2. Konstruktive Maßnahmen

*Verschleißgerecht* gestalten heißt, durch tribologische Maßnahmen (System: Werkstoff, Wirkgeometrie, Oberfläche, Schmiermittel/Fluid) oder durch reine werkstofftechnische Maßnahmen die für den Betrieb erforderlichen Relativbewegungen zwischen belasteten Bauteilen möglichst verschleißarm aufzunehmen.

Wie auch bei anderen Beanspruchungen, z. B. Korrosion, wird man zunächst anstreben, die Ursachen für den betreffenden Verschleißmechanismus zu vermeiden (*Primärmaßnahmen*). Das bedeutet, z. B. Festkörperreibung (Ruhreibung, Trockenreibung) und Mischreibung durch tribologische Maßnahmen zu umgehen und nur Flüssigkeitsreibung zuzulassen. Das kann bei Gleitbewegungen durch den elastohydrodynamischen Effekt erreicht werden, der sich mit einer bestimmten Fluidviskosität, Gleitgeschwindigkeit und Wirkflächenbelastung als Flüssigkeitsreibung erzeugen lässt. Bei Vorliegen von Konstruktions- und Betriebsbedingungen, die nicht den elastohydrodynamischen Effekt ermöglichen, kommen hydrostatische Systeme oder magnetische Systeme infrage. Bei kleinen Bewegungen ist auch der Einsatz elastischer Gelenke zu erwägen.

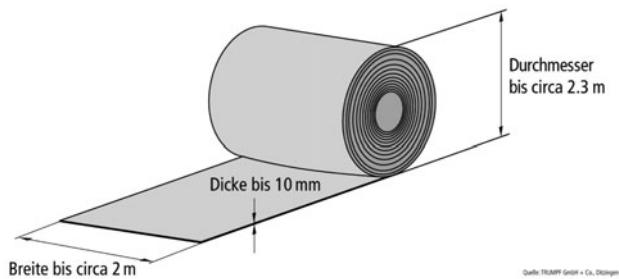
Sind Primärmaßnahmen zur Ursachenvermeidung nicht möglich, müssen werkstoffseitige und schmierungstechnische *Sekundärmaßnahmen* vorgenommen werden, mit denen die Verschleißrate zumindest reduziert werden kann. Zur Minderung aller Verschleißerscheinungen ist zunächst der örtliche Energieeintrag durch die Reibleistung pro Fläche  $p \cdot v_r \cdot \mu$  zu begrenzen, indem die Flächenpressung  $p$ , die Relativgeschwindigkeit  $v_r$  und/oder der Reibwert  $\mu$  herabgesetzt werden. In Czichos und Habig (1992) sind für zahlreiche praxisübliche Werkstoffkombinationen Reibungszahlen und Verschleißkoeffizienten für Gleitpaarungen angegeben:

$$\text{Verschleißkoeffizient} = \text{Gleitweg} \times \frac{\text{Verschleißvolumen}}{\text{Normalkraft}}$$

Verschleißgerecht Gestalten heißt aber auch, wenn Verschleiß nicht zu vermeiden ist, an folgende Maßnahmen zu denken:

- Verschleißpartikel müssen aus dem Fluidstrom herausgefiltert werden, um nicht durch Anreicherung des Fluids die Verschleißrate noch zu erhöhen.

**Abb. 13.26** Blechcoil (Trumpf 2011)



**Tab. 13.1** Max. Größe Coilmaterial (Buchfink 2006)

Coilmaterial	
Max. Breite	Ca. 2 m
Max. Dicke	Bis 10 mm
Max. Rollendurchmesser	Bis 2,3 m

- Strukturen mit verschleißgefährdeten Wirkflächen sollten möglichst nach dem „Prinzip der Aufgabenteilung“ gestaltet sein, d. h., die Verschleißzonen sollten leicht auswechselbar und aus einem verschleißfesten Werkstoff kostengünstig herstellbar sein, ohne die Gesamtstruktur zu verteuern.
- Durch Verschleißmarken sollten Verschleißzustände gekennzeichnet werden, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten und rechtzeitige Instandhaltungsmaßnahmen zu unterstützen.

## 13.6 Blechgerecht (Jörg Heusel, Thomas Bronnhuber)

### 13.6.1 Blech

Als Blech wird ein flaches Halbzeug aus Eisen- oder Nichteisenwerkstoffen bezeichnet, dessen Dicke sehr gering gegenüber den anderen Abmessungen ist. Das Ausgangsprodukt für Blech sind sog. Brammen. Sie werden im Block- oder Stranggussverfahren hergestellt. In einem Warmwalzprozess werden sie bei Temperaturen weit über der Rekristallisationstemperatur zu Warmband umgeformt (vgl. Klocke 2006). Dieses Fertigungsverfahren erklärt auch das anisotrope Verhalten von Blechen. In DIN EN 10029 sind die Eigenschaften warmgewalzter Stahlbleche definiert. So liegt die Nenndicke dieser Bleche im Bereich von 3 bis 400 mm bei einer Mindestbreite von 600 mm (vgl. Fischer 2002).

Bleche werden grundsätzlich in zwei Formen geliefert. Die eine ist das Coil. Dabei wird das Blech entsprechend Abb. 13.26 aufgewickelt. Die maximalen Coil-Abmessungen sind in Tab. 13.1 wiedergegeben.

Die zweite Lieferform für Bleche sind Tafeln. Das Blech wird in ebener Form in unterschiedlichen Abmessungen geliefert. Neben verschiedenen Sondergrößen gibt es Blechtafeln in den drei entsprechend Tab. 13.2 aufgeführten Abmessungen. Für die Konstruktion von Blechbauteilen bedeutet dies, dass u. U. eine Bauteilwand aus mehreren Blechtafeln zusammengesetzt werden muss.

Um die Maßgenauigkeiten des Halbzeugs zu erhöhen und/oder die Blechdicke weiter zu verringern, kann das Warmband in einem nachgeschalteten Kaltwalzprozess weiter verarbeitet werden. Die DIN EN 10130 (2006) für kaltgewalzte Flacherzeugnisse ohne Überzug fasst die Eigenschaften von Blechen im Dickenbereich von mindestens 0,35–3 mm zusammen (DIN EN 10130 2006) und bezieht sich auf eine Mindestbreite von 600 mm. Eine wichtige Eigenschaft kaltgewalzter Flacherzeugnisse ist die Vermeidung von Fließfiguren während der Tiefziehbearbeitung. Durch das Kaltwalzen lässt sich der Anisotropiewert verändern (vgl. DIN EN 10130 2006; Klocke 2006). Abschließende Verarbeitungsschritte für kalt- und warmgewalzte Bleche sind beispielsweise das Rekristallisationsglühen oder Beschichten.

### 13.6.1.1 Die Blechbearbeitung

Wie bei jeder Konstruktion, so sind auch beim Gestalten mit Blech die drei Haupteinflussfaktoren Werkstoff, Wirtschaftlichkeit und Fertigungstechnologie zu beachten. Da Blech definitionsgemäß dünn ist im Verhältnis zu seiner flächigen Ausdehnung, fehlt ohne entsprechende Maßnahmen Blechbauteilen die geometrische Steifigkeit. Die Bauteile sind z. B. biegeschlaff. Um blechgerechte Bauteile zu gestalten, die insbesondere ihre Festigkeitsaufgabe erfüllen können, sind bei der Konstruktion mit Blech einige Regeln zwingend zu beachten. Diese sind im Folgenden aufgeführt (vgl. Bode 1996; Trumpf 2003, 2009):

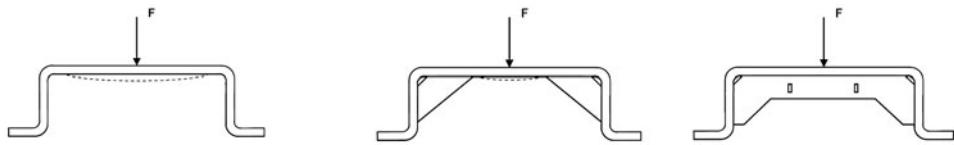
#### Krafteinleitung

- Kräfte möglichst flächig einleiten und
- ist eine flächige Einleitung von Kräften nicht möglich, Abstützungen durch Verstrebungen vorsehen, um die Krafteinleitung zu begünstigen.

Abbildung 13.27 zeigt auf der linken Seite symbolhaft die Problematik einer Blechkonstruktion. Wie oben beschrieben, sind Blechbauteile ohne besondere Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit relativ nachgiebig. Durch das Anbringen von Winkelverstrebungen kann die Krafteinleitung in das Bauteil verbessert werden, vgl. Beispiele in der Mitte und rechts.

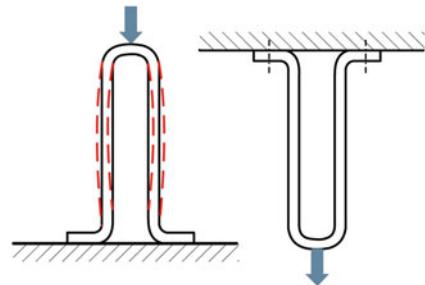
**Tab. 13.2** Unterscheidung Tafelformate (Buchfink 2006)

Blechtafel	Normaltafel	Mitteltafel	Großtafel
Format	1.000 × 2.000 mm	1.250 × 2.500 mm	1.500 × 3.000 mm

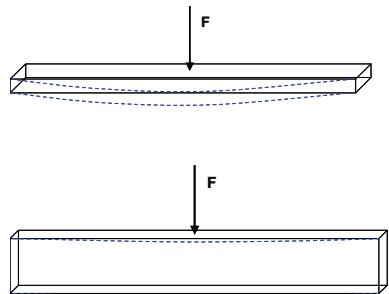


**Abb. 13.27** Gestaltung der Krafteinleitungsstellen

**Abb. 13.28** Blechgerechte Gestaltung des Kraftflusses.  
(Quelle: TRUMPF GmbH + Co., Ditzingen) (Trumpf 2011)



**Abb. 13.29** Biegung an schmalen langen Bauteilen



## Kraftfluss

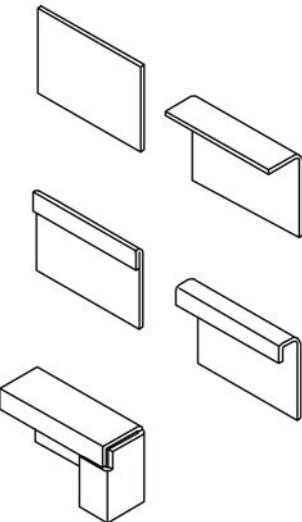
- Zugbelastungen bevorzugen, da lange Bauteile mit schmalen Querschnitten bei Druckbelastungen knicken oder ausbeulen können (s. Abb. 13.28 und Abb. 13.29) und
- durch Quer- und Längsverstrebungen Bauteile in der Krafteinleitungsebene verstärken und so den Kraftfluss gezielt verteilen.

Der linke Teil von Abb. 13.28 verdeutlicht, zu welchen Verformungen im Bauteil es bei falscher Auslegung ohne Beachtung des idealen Kraftflusses kommen kann. Bei Druckbelastung von Blechbauteilen ist die Steifigkeit unbedingt zu beachten.

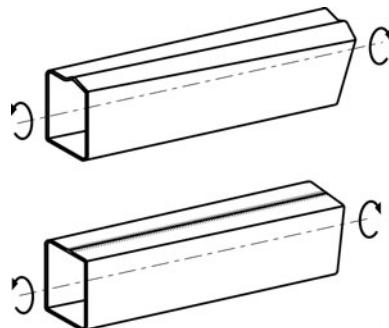
## Steifigkeit und Stabilität

- Blechdicke an belasteten Stellen erhöhen,
- Umformungen vorsehen, wie Sicken, kreuzweises Knicken, Abkantungen oder Falze (s. Abb. 13.30).

**Abb. 13.30** Versteifung durch Falzen und Abkanten (Trumpf 2011)



**Abb. 13.31** Versteifung durch Profilschluss (Trumpf 2011)

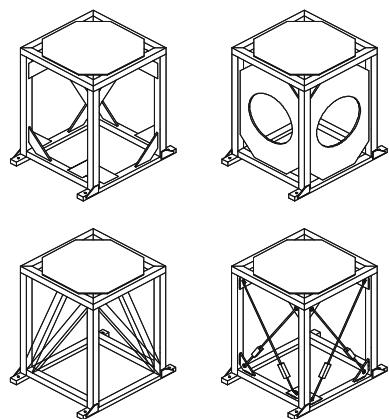


- Querschnitte schließen zur Versteifung bei Torsionsbelastung (s. Abb. 13.31) und
- Verbundkonstruktionen mit Rippen, Stäben, Verstrebungen und Versteifungsblechen oder Schubfeldkonstruktionen wählen, s. Abb. 13.32.

Das Einbringen von Sicken ist ein bereits während des Zuschnitts realisierbares Verfahren zur Erhöhung der Steifigkeit. Durch das Einbringen der Sicken in das Bauteil wird der Querschnitt, welcher zu Berechnung des axialen Widerstandsmomentes herangezogen wird, erhöht (Fischer 2002; Grote et al. 2007).

Schubfelder zählen zu den bekannten Konstruktionselementen des Leichtbaus. Dabei wird auf ein Rahmenprofil aus gelenkig gelagerten dehnelastischen, aber biegestarren Stäben ein Blech kraftschlüssig angebracht. Das Fachwerk aus den Stäben wird durch die Verbindung mit dem Blech zu einer Kraft aufnehmenden Struktur, da die Stäbe die Längskräfte aufnehmen können und das Blech die Schubkraft (Klein 2012).

**Abb. 13.32** Versteifung durch Rippen, Stäbe, Verstrebungen und Zugseile (Trumpf 2011)



### 13.6.1.2 Wirtschaftliche Aspekte der Gestaltung mit Blech

Neben den mechanischen Eigenschaften von Blechkonstruktionen sind wirtschaftliche Aspekte zu beachten. Diese sind im Folgenden aufgeführt (vgl. Bode 1996; Trumpf 2003; Trumpf 2009):

- Wahl einer geringen Blechdicke zur Reduktion von Material und Fertigungskosten,
- Verwendung möglichst nur einer Blechdicke, um den Zuschnitt aus einer Blechtafel zu ermöglichen und um den Logistikaufwand zu reduzieren,
- Gleichteile mit mehreren Funktionen einsetzen, um die Stückzahl pro Teil zu erhöhen,
- Zusammenfassen von Einzelteilen zu einteiligen Bauteilen, da komplizierte Blechteile in der Einzel- und Kleinserie wirtschaftlicher sind als Schweißkonstruktionen aus Halbzeugen und
- Ersetzen von Schweißnähten durch Umformungen, da Schweißen ein kostenintensiver Prozess ist, der zu Wärmeinbringung und Verzug führt und Vor- und Folgeprozesse mit sich bringt (Ausrichten, Verspannen, Richten, Verputzen).

Ebenfalls zu den wirtschaftlichen Einflussgrößen lässt sich der Korrosionsschutz bei der Gestaltung des Bauteils zuordnen. Für die Auslegung zum Korrosionsschutz sind folgende Punkte zu beachten:

- Vermeidung von offenen Hohlräumen, in die Feuchtigkeit eindringen kann, und
- Vermeidung von Stellen, an denen sich Feuchtigkeit und Wasser sammeln können.

Unter Beachtung der hier aufgeführten Gestaltungsregeln, die optimiert sind auf Anwendungen im Blechdickenbereich unterhalb von 10 mm (Buchfink 2006), können die Vorteile des Blechs – sein geringes Gewicht und seine gute Formbarkeit – die nachteiligen Faktoren der geringen Stabilität und Steifigkeit kompensieren.

### 13.6.2 Die Prozesskette Blech

Eine ganzheitliche Betrachtung – von der Entwicklung bis zur Fertigstellung eines Bauteiles – ermöglicht ein tieferes Verständnis für das Wesen einer Blechkonstruktion. Durch eine enge Verknüpfung der Hauptabschnitte im Produktentstehungsprozess, den Bereichen Konstruktion und Fertigung, können alle Anforderungen an das zu entwickelnde Blechbauteil berücksichtigt werden. Dies führt zu einer Steigerung der Konstruktionsqualität.

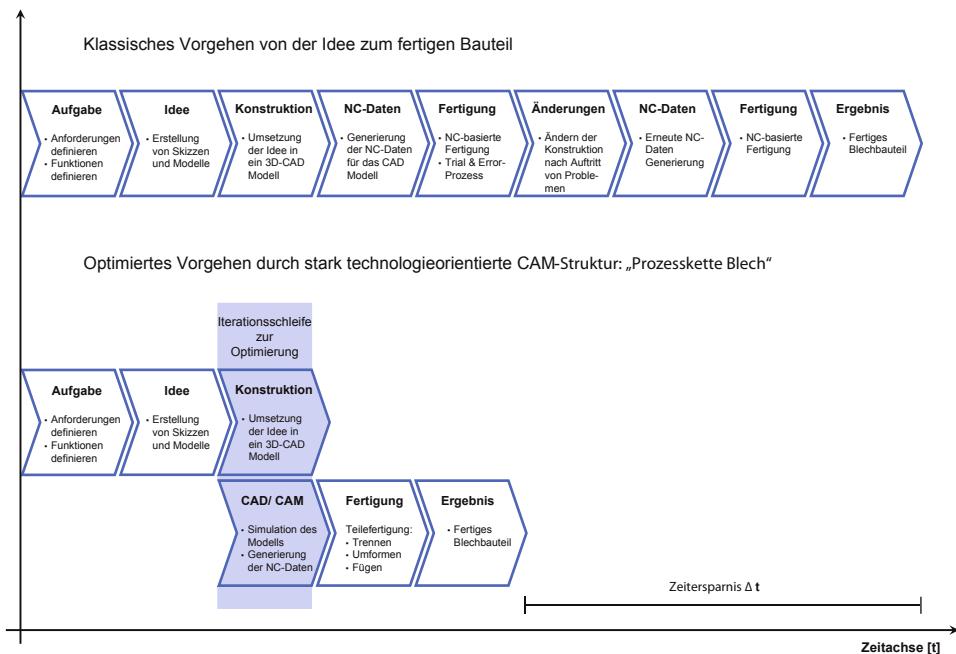
Die Problematik bei der Konstruktion mit Blech besteht in dem Umstand, dass die Qualität eines Blechbauteils von der Konstruktion und den Fertigungsparametern abhängt. Die Fertigungsparameter wiederum werden von den verwendeten Maschinen und dem Blechhalbzeug, Festigkeit und Abmessungen beeinflusst. Damit ergibt sich ein Abhängigkeitsnetzwerk dieser Parameter, das nicht ohne Weiteres durchschaubar ist und in der Praxis viel Erfahrung in der Verarbeitung von Blech erfordert.

Große Werkzeugmaschinenhersteller im Bereich der Blechbearbeitung stellen Datenbanken zur Verfügung, die auf Basis langjähriger Arbeit entwickelt wurden, und verknüpfen diese bereits mit dem Programm zur 3-D-Konstruktion des Bauteils. Die Werkzeugmaschinenhersteller setzen nicht mehr nur auf die ausschließliche Integration einer Erfahrungsdatenbank in das CAD-Programm, sondern liefern mit einer zusätzlichen CAM-Schnittstelle die Möglichkeit zur Simulation der weiteren Fertigungsschritte. Leitete vormals die Fertigung die Fehlermeldung und die damit verbundene Iterationsschleife zur Optimierung ein, können heute Fehler innerhalb weniger Minuten während der Simulation aufgedeckt werden. Ein weiterer Vorteil, der ebenfalls Aufwände minimiert, ist die Möglichkeit zur Generierung der NC-Daten für die Fertigung aus der CAM-Schnittstelle. Abbildung 13.33 zeigt im oberen Teil eine Gegenüberstellung der klassischen Vorgehensweise bei der Blechgestaltung und unten die Blechbearbeitung mit der Fertigungstechnologie-orientierten Prozesskette Blech mit CAD/CAM-Schnittstelle.

Das enorme Potenzial zur Zeitersparnis durch die Verkürzung der Iterationsschritte wird deutlich, wenn man die Zeitachse (x-Achse) betrachtet. Nachfolgend werden Fertigungsverfahren und dazugehörige Gestaltungsrichtlinien vorgestellt.

### 13.6.3 Gestalten mit Blech

In diesem Kapitel werden Fertigungsverfahren und Gestaltungsregeln entsprechend der Fertigungstechnologien Trennen, Biegen und Fügen vorgestellt. Des Weiteren beinhaltet die abschließenden Optimierungsbeispiele weitere Regeln und verdeutlichen deren Umsetzung in der Konstruktion. Aus den Fertigungsverfahren ergeben sich die fertigungstechnologischen Gestaltungsregeln und Rahmenbedingungen. Die hier relevanten Fertigungsverfahren der DIN 8580 für die Blechbearbeitung sind Trennen, Umformen und Fügen (vgl. DIN 8580 2003).



**Abb. 13.33** Klassisches Vorgehen bei der Blechgestaltung und -bearbeitung und die „Prozesskette Blech“

### 13.6.3.1 Trennen

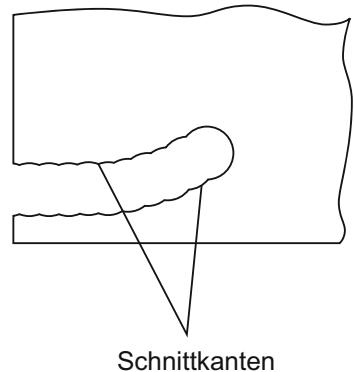
Das Verfahren Trennen wird abgebildet durch das Zerteilen (die spanfreie Trennung durch Scher- und Knabberschneiden) und die thermische Trennung (Laserschneiden) (vgl. Klocke 2006; DIN 8588 2003). Beim Knabberschneiden – auch Nibbeln – handelt es sich um einen mehrhubig fortschreitenden Scherschnitt, wobei die Abfallstücke entlang der Schnittkontur abgetrennt werden (DIN 8588 2003) (s. Abb. 13.34 und 13.35). In der industriellen Anwendung erfolgt das Scherschneiden auf Stanzmaschinen. Mit heutigen Maschinen lassen sich Blechdicken bis zu 8 mm verarbeiten. Vorteil der Stanzbearbeitung ist die Vereinigung von Scher- und Knabberschneidprozessen sowie die Möglichkeit zu einfachen Umformungen. So können Durchzüge und Gewinde (s. Abb. 13.38) in das Blech eingebracht werden und kleinere Biegeumformungen, wie das Einbringen von Kiemen (s. Abb. 13.36) direkt auf der Maschine erfolgen. Ebenso können Absetzungen und Versteifungssicken (s. Abb. 13.37) auf der Stanzmaschine geformt werden (vgl. Trumpf 2006).

**Laserschneiden** Verglichen mit konventionellen thermischen Trennverfahren, zeichnet sich der Laser durch eine schmale, annähernd senkrechte Schnittfuge, eine schmale Wärmeeinflusszone, eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit und einen berührungslosen Schnitt (Verschleißfreiheit) aus, s. Abb. 13.36, 13.40, 13.41.

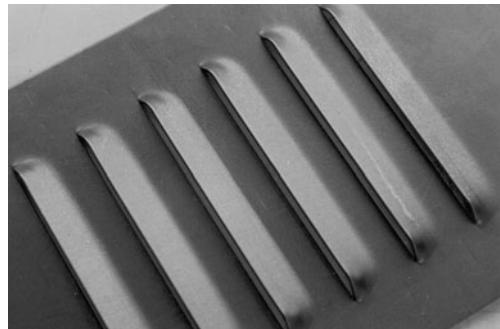
**Abb. 13.34** Werkstückkante nach dem Knabberschneiden (Trumpf 2011)



**Abb. 13.35** Schnittkante Knabberschneiden (Klocke 2006)



**Abb. 13.36** Umformung Kiemen (Trumpf 2011)



Die gebräuchlichsten Lasertypen sind längsgeströmte CO<sub>2</sub>-Gaslaser und Nd:YAG-Festkörperlaser (vgl. Klocke 2007).

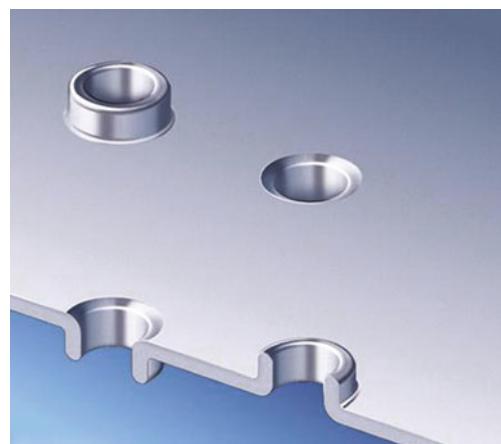
**CO<sub>2</sub>-Laser** Die Vorteile des CO<sub>2</sub>-Lasers liegen in der großen Bearbeitungsbandbreite (Baustahl bis 30 mm) und den hohen Schnittgeschwindigkeiten. Nachteilig wirkt sich die komplizierte Strahlführung aus, die die Flexibilität leicht einschränkt (vgl. Buchfink 2008).

**Nd:YAG-Festkörperlaser** Die Vorteile des Nd:YAG-Lasers liegen in seiner besseren Absorption von Buntmetallen (Erweiterung des Bearbeitungsspektrums) und der hohen

**Abb. 13.37** Umformung Versteifungssicken (Trumpf 2011)



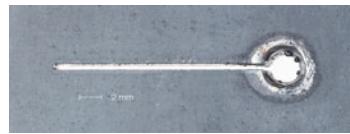
**Abb. 13.38** Umformung Gewindeformen (Trumpf 2011)



**Abb. 13.39** Beispiele für das Spektrum von Laserschnitten (Trumpf 2011)



**Abb. 13.40** Einstechen mit voller Leistung in 12 mm Baustahl (Trumpf 2011)



**Abb. 13.41** Einstechen mit geregelter Leistung in 12 mm Baustahl (Trumpf 2011)



Flexibilität. Die flexible Strahlführung ermöglicht die Anwendung von Robotern für die 3D-Bearbeitung. Die Bearbeitungsbandbreite reicht bis zu 10 mm Materialstärke, wobei der Schwerpunkt im Bereich unter 4 mm liegt (vgl. Buchfink 2008; Trumpf 2007c).

**Stanz-Laser-Anwendungen** Als erweiterte Maschinentechnologie kommen heute kombinierte Stanz-Laser-Maschinen zum Einsatz, s. Abb. 13.42. Sie vereinigen die Vorteile beider Fertigungstechnologien.

Bei ihrer Anwendung können während des Stanzvorgangs Umformungen, Gewinde oder eine Vielzahl von Löchern in das Werkstück eingebracht werden. Im nächsten Schritt schneidet der Laser die Geometrien mit einer wesentlich höheren Flexibilität frei. Durch die Bearbeitung in einer Aufspannung erhöht sich die Genauigkeit (vgl. Buchfink 2006; Trumpf 2007c).



**Abb. 13.42** TruMatic 7000 Stanz-Laserschneid-Maschine (Trumpf 2011)

**Gestaltungsregeln Fertigungstechnologie Trennen** Die folgende Tab. 13.3 faßt die relevanten Gestaltungsregeln für Blechbauteile und das Fertigungsverfahren Trennen zusammen. Die Rahmenbedingungen (R.B.) weisen darauf hin, wann spezifische Eigenschaften der Werkzeugmaschine besonders zu beachten sind.

### 13.6.3.2 Umformen

Die relevanten Umformverfahren für die Blechbearbeitung sind die Biegeumformung mit geradliniger und drehender Werkzeugbewegung sowie das Zugdruckumformen (Tiefziehen).

**Biegeumformung mit geradliniger Werkzeugbewegung** Der Vorteil des Freibiegens ist die große Bandbreite an zu fertigenden Winkeln, die zwischen ca.  $30^\circ$  und  $180^\circ$  liegt. Aktuelle Blechbiegemaschinen mit bis zu 6-achsigen Hinteranschlägen und einer Vielzahl an Werkzeugen bieten neue Anwendungsmöglichkeiten auch zur Bewältigung komplizierter Biegeaufgaben, s. Abb. 13.43, 13.44. Der 6-achsige Anschlag ermöglicht das Anlegen von nicht parallelen Kanten, und durch das Verschieben der unteren Werkzeugachse lassen sich Falze herstellen. Die breitgefächerte Werkzeugteilung sowie die hohe Variantenzahl an Werkzeugformen erweitern die Umformmöglichkeiten bis hin zur Schließung von Werkstücken mit Innenkantungen im Kollisionsbereich durch Hornwerkzeuge (vgl. Trumpf 2007a).

**Biegeumformung mit drehender Werkzeugbewegung** Ein gebräuchliches Verfahren der Biegeumformung mit drehender Werkzeugbewegung ist das Walzprofilieren. Es ermöglicht eine kostengünstige Herstellung von Profilen für den Leichtbau. Durch hintereinander geschaltete Walzenpaare wird das Blechband mit Walzgeschwindigkeiten von bis zu 100 m/min zu einem Profil umgeformt, wobei die Formgebung stufenlos fortschreitet. Pro Umformstufe wird dazu ein Walzenpaar benötigt (s. Abb. 13.45) (vgl. Klocke 2006; Schuler 1996).

**Zugdruckumformung** Durch Tiefziehen, ein Zugdruckumformungsverfahren, werden dreidimensionale Blechwerkstücke hergestellt. Das Verfahren bietet eine Vielzahl von Varianten, wie das Tiefziehen mit Wirkmedium, auf die an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen wird, vgl. Klocke (2006), DIN 8584 (2003).

**Gestaltungsregeln Fertigungstechnologie Umformen** Wie bereits für die Fertigungstechnologie Trennen, werden im Anschluss alle relevanten Gestaltungsregeln den Werkstoff Blech und das Fertigungsverfahren Umformen betreffend dargestellt, s. Tab. 13.4. Zusätzlich sind die von der Maschine vorgegebenen Rahmenbedingungen für die Anwendung angegeben.

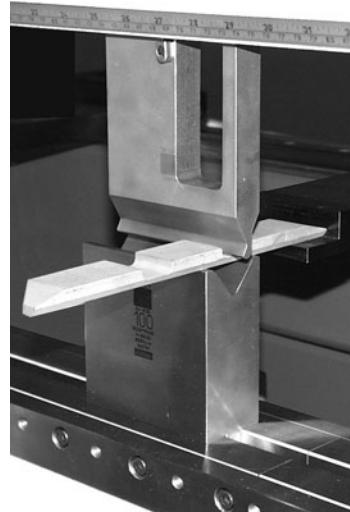
### 13.6.3.3 Fügen

Fügen kann stoff-, form- oder kraftschlüssig erfolgen. In der Blechbearbeitung geschieht dies durch Schweißen, Umformen, Zusammensetzen oder An- und Einpressen.

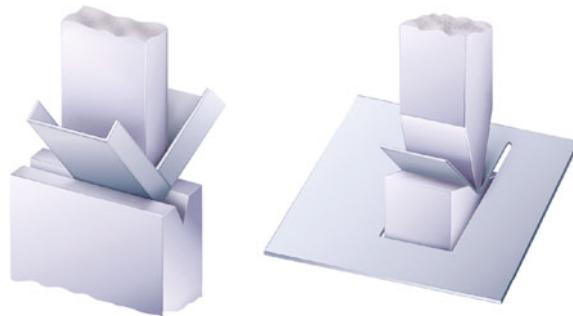
**Tab. 13.3** Gestaltungsregeln und Rahmenbedingungen für das Verfahren Trennen

Verfahren	Gestaltungsregel	R.B.	nicht blechgerecht	blechgerecht
Trennen	kompakte Abwicklung gestalten			
Trennen	maximale Tafelgröße beachten	X		
Trennen	gemeinsame Trennschnitte nutzen			
Trennen	Vorsehen von Freisparsungen an den Ecken mit allseitig umgebogenen Schenkeln			
Laser-schneiden	Abrunden von Ecken und Verwenden von Radien zur schnelleren Bearbeitung			
Laser-schneiden	Vermeiden vieler Einstiche im Dickblechbereich			
Laser-schneiden	Micro-Joints nutzen zur Bildung von Teilesätzen um Biegeaufwand zu reduzieren			
R.B.: Rahmenbedingungen				

**Abb. 13.43** Sonderwerkzeug zur Biegebearbeitung (Trumpf 2011)



**Abb. 13.44** Beachten der Werkzeugsbreite für spezielle Anwendung (Trumpf 2011)



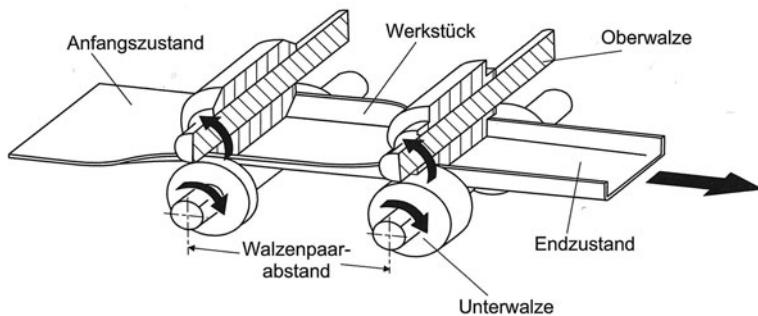
### Fügen durch Umformen

Beim **Falzen** auf der Biegemaschine werden die an den Rändern vorbereitete Blechteile (auf  $30^\circ$  vorgebogen (s. Abb. 13.46)) durch einen zweiten Biegevorgang zgedrückt. Dies ist bis zu einer Materialstärke von 3 mm im Baustahl möglich.

Beim **Falzen** mit Handwerkzeugen werden Blechteile ineinandergelegt oder -geschoben und erhalten durch eine weitere Abkantung (Schließen des Falzes, s. Abb. 13.47, 13.48) eine formschlüssige Verbindung ohne Wärmeeinbringung realisiert.

**Durchsetzfügen, Clinchen** Werkstückteile werden durch gemeinsames Verschieben (Schubumformung) gegenüber angrenzenden Werkstückflächen formschlüssig verbunden.

In Verbindung mit Einschneiden und nachfolgendem Stauchen bezeichnet man dies als Durchsetzfügen, s. Abb. 13.49, 13.50. Entfällt der Schneidanteil, spricht man vom Clinchen, s. Abb. 13.51, (vgl. DIN 8593 2003; DIN 8587 2003).



**Abb. 13.45** Walzprofilieren (Klocke 2006)

**Verlappen** Hervorstehende Zapfen am freien Ende eines Werkstückes werden in ein weiteres Werkstück eingesteckt und verdreht und bilden den Formschluss, s. Abb. 13.52. Dieses Verfahren findet vor allem im Dünblechbereich Anwendung (vgl. DIN 8593 2003).

**Nieten** Durch die Stauchung eines Hilfsfügeteils, das in zuvor eingebrachte Öffnungen der zu verbindenden Werkstücke eingefügt wird, erfolgt der Formschluss (DIN 8593 2003).

**Anpressen, Einpressen** Schraubverbindungen führen zu kraftschlüssigen Verbindungen durch Anpressen, Abb. 13.53, 13.54.

Vorteil dieses Verfahrens ist die Lösbarkeit der Verbindung, die sich allerdings bei dynamisch belasteten Teilen auch nachteilig auswirken kann (vgl. Grote et al. 2007; DIN 8593 2003).

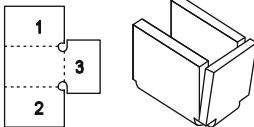
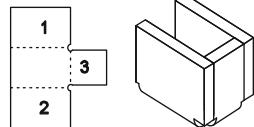
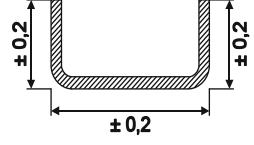
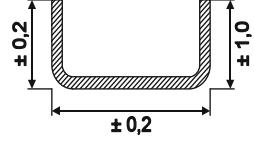
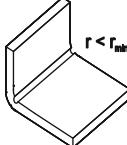
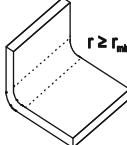
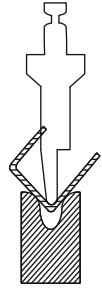
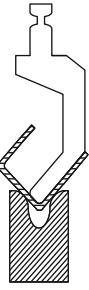
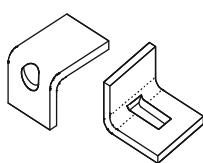
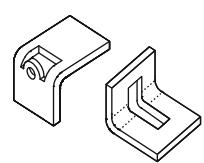
**Zusammensetzen** Bei niedrig belasteten Blechkonstruktionen im Dünblechbereich kann der Formschluss durch Aufschieben, Einschieben, Clipsen und Einrasten realisiert werden. Die Umsetzung erfolgt beispielsweise mit Zentrierwarzen (s. Abb. 13.55, 13.56), die in vorgesehene Öffnungen einrasten oder durch ineinanderpassenden Puzzle-Teilzuschnitt (vgl. DIN 8593 2003; Trumpf 2003).

**Fügen durch Schweißen** Schweißen, als stoffschlüssiges Verfahren, bietet eine Vielzahl von Anwendungen. Diese umfassen konventionelle Methoden (MSG, WIG), s. Abb. 13.57 bis hin zum Laserschweißen, s. Abb. 13.58.

Laserschweißen erfolgt unter Verwendung von Schutzgas und erfordert aufgrund des geringen Strahldurchmessers im Fokus eine exakte Nahtvorbereitung sowie eine hohe Führungs- und Positioniergenauigkeit zwischen Werkstück und Strahl (Dilthey 2006).

**Gestaltungsregeln Fertigungstechnologie Fügen** Für die Fertigungstechnologie Fügen zeigt die folgende Tab. 13.5 alle relevanten Gestaltungsregeln auf. Zusätzlich sind die von der Maschine vorgegebenen Rahmenbedingungen für die Anwendung angegeben.

**Tab. 13.4** Gestaltungsregeln und Rahmenbedingungen für das Umformen

Verfahren	Gestaltungsregel	R.B.	nicht blechgerecht	blechgerecht
Biegen	Beachten der Rückfederung beim Biegen			
Biegen	Ein Biegeschenkel muss die Toleranz aufnehmen			
Biegen	Beachten von Mindestwerten für Biegeradien			
Biegen	Beachten der möglichen Werkzeuggeometrien und -teilungen	X		
Biegen	Anstreben von Öffnungen außerhalb der Biegezone oder über diese hinweg			

**Tab. 13.4** (Fortsetzung)

Verfahren	Gestaltungsregel	R.B.	nicht blechgerecht	blechgerecht
Stanzen	Durchzüge mit Gewinde			
Biegen	Beachten der Mindestschenkel-länge	X		
Biegen	Beachten der max. Schenkkellänge	X		
Biegen	Beachten der max. Profilhöhe	X		
R.B.: Rahmenbedingungen				

**Abb. 13.46** Falzen Vorbiegen auf 30° (Trumpf 2011)



**Abb. 13.47** Verschiedene Formen von Falzen (Trumpf 2011)



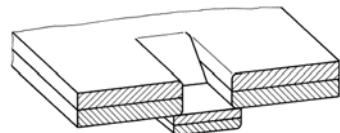
#### 13.6.3.4 Allgemeine Gestaltungsmöglichkeiten

Abschließend werden Vorschläge für die Eckengestaltung dargestellt. Bei der Ecken-gestaltung von Blechbauteilen kann auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Ansätzen zurückgegriffen werden. Abbildung 13.59 zeigt die drei gebräuchlichsten Möglichkeiten zur Eckengestaltung. Die Anwendung dieser Möglichkeiten vereinfacht die Gestaltung von Blechbauteilen.

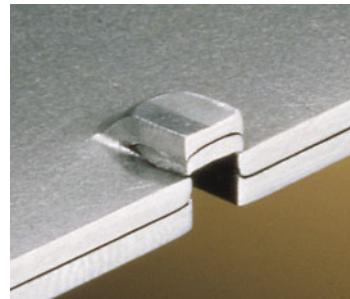
**Abb. 13.48** Falzen Schließen des Falzes (Trumpf 2011)



**Abb. 13.49** Durchsetzfügen (DIN 8593 2003)



**Abb. 13.50** Beispiel Durchsetzfügen (Trumpf 2011)



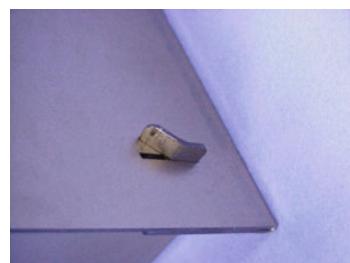
**Abb. 13.51** Clinchen (Trumpf 2011)



#### 13.6.4 Einsatzbereiche der Fertigungsverfahren

Die meisten Fertigungsverfahren bieten eine gewisse Bandbreite bei ihrer Anwendung. Das anschließende Diagramm, s. Abb. 13.60, gibt einen Überblick über die für die Blechbearbeitung relevanten Fertigungstechnologien und die jeweils einsetzbaren Blechdickenbereiche.

**Abb. 13.52** Verdrehzapfen  
(Trumpf 2011)



**Abb. 13.53** Stanzformung  
zum stirnseitigen Verbinden  
dünner Bleche (Trumpf 2011)



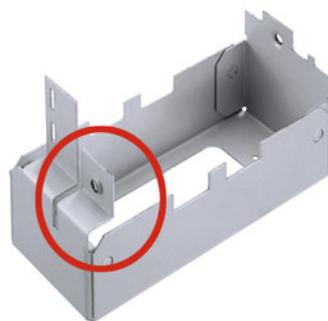
**Abb. 13.54** Gewindeform-  
stanzung (entsprechend einem  
Gewindegang einer  
Blechschraube) (Trumpf 2011)



**Abb. 13.55** Zusammensetzen  
mit Schnappecken (Trumpf  
2011)



**Abb. 13.56** Zusammensetzen mit Zentrierwarzen (Trumpf 2011)



**Abb. 13.57** Konventionell WIG geschweißt (Trumpf 2011)

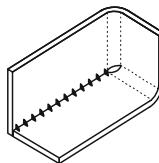
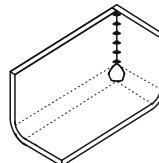
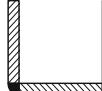
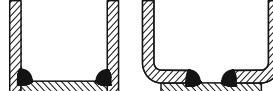
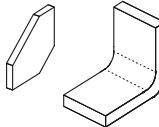
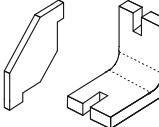
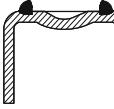
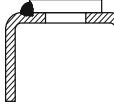
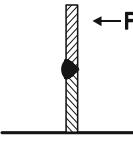
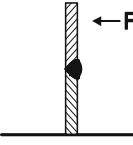
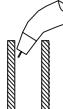
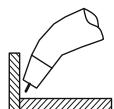
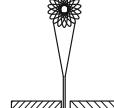


**Abb. 13.58** Laser-Wärmeleitschweißen (Trumpf 2011)

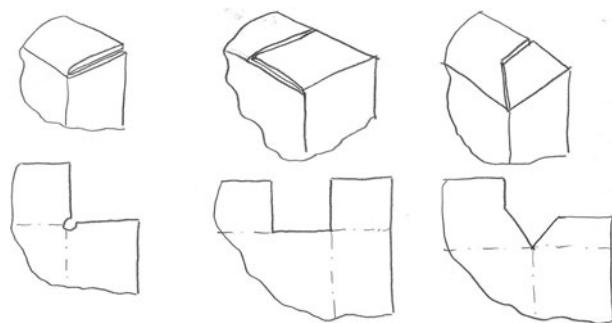


Um stärker zwischen den Einsatzbereichen der Verfahren differenzieren zu können, sind zusätzliche Fertigungsverfahren, wie das autogene Brennschneiden, das Plasmaschneiden und das Plasmawelding, aufgeführt. Hat der Balken im Diagramm eine rechteckige Form, ist das jeweilige Fertigungsverfahren ohne Einschränkungen anwendbar. Bei spitz zulaufenden Enden an den Balken handelt es sich um Blehdickenbereiche, auf die sich Fertiger stark spezialisiert haben, die allerdings keine breite, standardisierte Anwendung finden.

**Tab. 13.5** Gestaltungsregeln und Rahmenbedingungen für das Fügen

Verfahren	Gestaltungsregel	R.B.	nicht blechgerecht	blechgerecht
Schweißen	Lange Kanten Biegen, kurze Kanten Schweißen			
Schweißen	Schweißnahtlage an Stellen vorsehen, die Verputzarbeit verringern			
Schweißen	Verwendung von Fügehilfen zur Reduzierung des Vorrichtungs- aufwandes			
Schweißen	Verzug von Schweißkonstruk- tionen reduzieren			
Schweißen	Wahl der Schweißnahtlage dem Belastungsfall anpassen			
Schweißen	Beachten der Zugänglichkeit des Schweißkopfes	X		
Laser- schweißen	Sehr geringe Spaltmaße bei der Nahtvorbereitung	X		
R.B.:Rahmenbedingungen				

**Abb. 13.59** Eckengestaltung an Blechbauteilen



### 13.6.5 Beispiele

Die konsequente Anwendung der oben aufgeführten Gestaltungsregeln ermöglicht es, eine aus genormten Halbzeugen konstruierte Konstruktion durch eine Blechkonstruktion zu ersetzen, die insbesondere hinsichtlich der Kosten deutliche Vorteile bietet. Häufig ist es auch möglich, das Gewicht zu reduzieren. In den folgenden Beispielen wird das Vorgehen zur Erstellung einer optimalen Blechkonstruktion schrittweise dargestellt.

Bei den ersten beiden Beispielen liegt der Schwerpunkt auf einer wirtschaftlichen Optimierung. Im dritten Beispiel, bei dem ein bewegtes Bauteil betrachtet wird, steht eine Gewichtsreduzierung bei konstanter Steifigkeit im Fokus der Konstruktion.

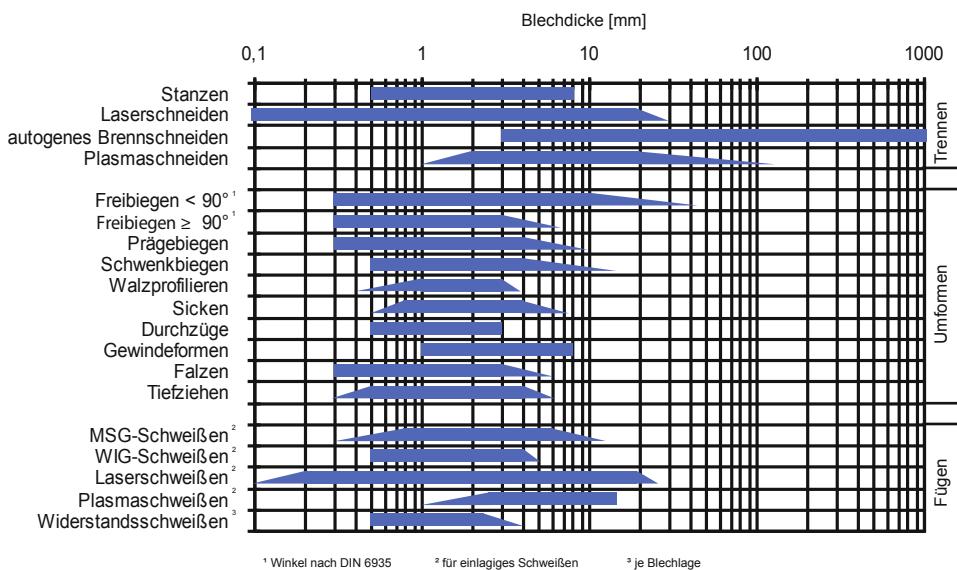
#### 13.6.5.1 Optimierung einfacher Bauteile

Dieses Beispiel erläutert, wie durch konsequente Anwendung der oben aufgeführten Gestaltungsregeln und Nutzung moderner Fertigungstechnologien die Kosten deutlich reduziert werden können. Schon bei diesem einfachen Bauteil werden die Möglichkeiten einer konsequenten Blechkonstruktion deutlich. Im Folgenden ist das Vorgehen erläutert und in Tab. 13.6 wiedergegeben.

Die Fertigungsschritte für die Ausgangskonstruktion sind

- Zuschnitt der Halbzeuge,
- Einbringen der Bohrungen,
- Entgraten der Bauteile,
- Ausrichten der Bauteile für den Schweißprozess,
- Einspannen der Bauteile in Vorrichtung,
- Schweißen der Bauteile und
- Richten und Verputzen.

Unter Anwendung der Gestaltungsregel „Vorsehen von Fügehilfen“ wird der Vorrichtungsaufwand verkürzt, da die Fügehilfen die Aufgabe der Vorrichtung übernehmen. Die nächste Optimierungsstufe sieht eine Teilereduzierung vor.



**Abb. 13.60** Fertigungsverfahren und deren anwendbare Blechdickenbereiche (vgl. Fischer 2002; Grote et al. 2007; Klocke 2006; Buchfink 2006; Dilthey 2006; Reisgen 2010; Trumpf 2007b; Schuler 1996)

- Reduktion der Teileanzahl,
- einteiliges statt zweiteiliges Bauteil und
- Schweißen entfällt noch nicht, dennoch liegt bereits ein hohes wirtschaftliches Optimierungspotenzial vor.

Die letzte Optimierungsstufe bringt ein einteiliges Bauteil mit dem Verzicht auf den Schweißprozess hervor.

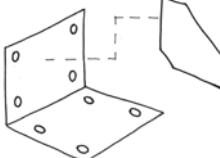
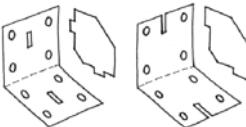
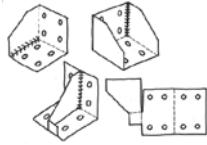
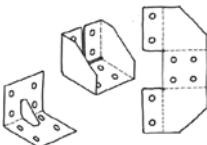
- Schweißnähte werden in Biegungen überführt und somit in der Fläche getrennt. Die Steifigkeit wird durch die Anbindung geschaffen,
- ausreichend hohe Steifigkeit für den Einsatz und
- weitere Möglichkeit der Steifigkeitserhöhung: Einbringen einer Versteifungssicke im Biegeprozess.

### 13.6.5.2 Optimierung komplexerer Bauteile

Das zweite Beispiel zeigt den Optimierungsprozess eines etwas komplexeren Bauteils als im vorhergehenden Beispiel. Auch hierbei geht es um eine Reduktion der Kosten. Die Ursprungskonstruktion besteht in diesem Fall aus vier Einzelteilen. Folgende Ansatzpunkte zur Kostenreduktion lassen sich erkennen:

- Rohr (kostenintensives Halbzeug) → großes wirtschaftliches Optimierungspotenzial
- Ersetzen eines Rohres durch ein Blechteile → Kostenreduzierung um ein Drittel

**Tab. 13.6** Optimierungsschritte für die wirtschaftliche Optimierung einfacher Bauteile

Winkel	Fertigungsverfahren	Gestaltungsregel	Wirtsch. Optimierung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sägen</li> <li>• Bohren</li> <li>• Entgraten</li> <li>• Verspannen</li> <li>• Schweißen</li> <li>• Richten</li> <li>• Verputzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konstruktion mittels vorhandener Halbzeuge</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden</li> <li>• Biegen</li> <li>• Schweißen</li> <li>• Richten</li> <li>• Verputzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fügehilfen vorsehen und so Vorrichtungsaufwand reduzieren</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden/ Stanzen</li> <li>• Biegen</li> <li>• Schweißen</li> <li>• Richten</li> <li>• Verputzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teileanzahl reduzieren</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden/ Stanzen</li> <li>• Biegen/ Sicken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schweißen ersetzen</li> </ul>	
 aktuelle Kosten – 100%		 weiß: prozentuale Kostenersparnis blau: reduzierte Kosten durch Optimierung	

Weitere Einflussgrößen sind

- Länge des Rohres und
- Anzahl der einzubringenden Bohrungen.

Im ersten Optimierungsschritt werden unter Anwendung der Gestaltungsregel „Teileanzahl reduzieren“, die ursprünglich vier Halbzeugteile zu einem Blechbiegeteil zusammengefasst. Die Folgen sind

- Reduktion der Anzahl der Bauteile und
- nur noch zwei Schweißnähte statt vier Schweißnähte.

Im zweiten Optimierungsschritt wird dann der Fügeprozess komplett ersetzt und die Anzahl der Biegungen reduziert, s. Tab. 13.7 oben. Die dritte Optimierungsstufe bringt zwar wieder eine Biegung mehr in das Bauteil ein, allerdings ist unter Anwendung der Gestaltungsregel „Kraftfluss optimieren“ dieser extrem verbessert, s. Tab. 13.7 unten.

### **13.6.5.3 Steifigkeitserhöhung und Gewichtsreduzierung eines bewegten Balkens**

Ziel der Optimierung eines bewegten Balkens, der Torsionsbelastungen ausgesetzt ist, ist eine optimierte Leichtbaukonstruktion bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten. Die klassische Halbzeugkonstruktion besteht aus zwei verschweißten Rohren, s. Abb. 13.61.

An die Rohre werden die Leisten für die späteren Laufflächen angeschweißt. Würde die klassische Konstruktion mittels Halbzeugen beibehalten werden, wäre die einzige Möglichkeit, die Steifigkeit zu erhöhen, eine Erhöhung der Materialstärke der Rohre, da die äußeren Abmessungen gleich bleiben müssen. Unter Verwendung einer Blechblechkonstruktion und der Anwendung der Gestaltungsregel „Versteifung durch Rippen“, erfolgt eine Neukonstruktion des Bauteils.

Die Neukonstruktion umfasst dabei folgende Schritte:

#### **Schritt 1:**

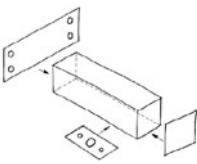
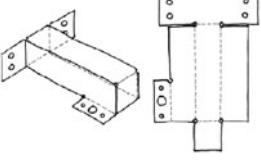
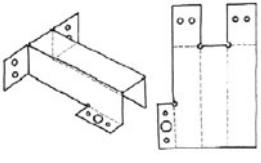
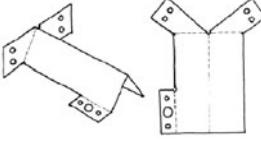
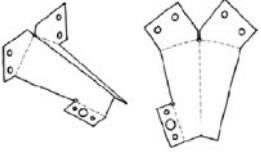
- Äußerer Rahmen in C-Kantung,
- Versteifung durch eingesteckte Querrippen, verteilt über die gesamten Länge (besser geeignet für Torsionsbelastungen),
- Fügehilfen für eingebrachte Rippen (Reduktion des Vorrüstungsaufwands),
- Leisten für die Laufflächen weiterhin angeschweißt und
- konventionelle Schweißverfahren.

Im nächsten Optimierungsschritt wird die Blechdicke an weniger belasteten Stellen des Bauteils verringert. Dadurch kommt es zu einer Gewichtsreduktion, die keinen Einfluss auf die Steifigkeit hat.

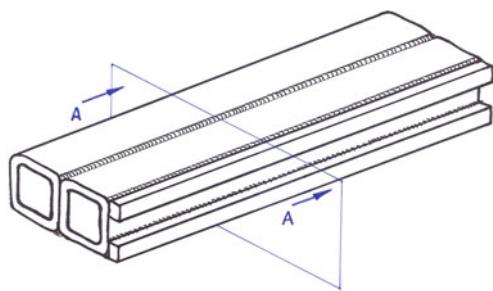
#### **Schritt 2:**

- Laserschweißen, da Verschweißung unterschiedlicher Blechdicken,
- konventionelle Schweißverfahren weisen bei dieser Art der Verschweißung oft Probleme durch ihre hohe Wärmeeinbringung auf,
- weitere Materialersparnis und somit Gewichtsreduktion durch Optimierung für Laserschweißprozess und
- Schweißnähte im Stumpfstoß.

**Tab. 13.7** Optimierungsschritte für die wirtschaftliche Optimierung komplexerer Bauteile

Halter	Fertigungsverfahren	Gestaltungsregeln	Wirtsch. Optimierung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sägen</li> <li>• Bohren</li> <li>• Entgraten</li> <li>• Verspannen</li> <li>• Schweißen</li> <li>• Richten</li> <li>• Verputzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konstruktion mittels vorhandener Halbzeuge</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden</li> <li>• Biegen</li> <li>• Schweißen</li> <li>• Richten</li> <li>• Verputzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teileanzahl reduzieren</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden</li> <li>• Biegen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schweißen ersetzen</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden</li> <li>• Biegen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegungen reduzieren</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserschneiden</li> <li>• Biegen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftfluss optimieren</li> </ul>	
 aktuelle Kosten – 100%		<b>weiß: prozentuale Kostenersparnis</b>  <b>blau: reduzierte Kosten durch Optimierung</b>	

**Abb. 13.61** Skizze „bewegter Balken“ als Halbzeugkonstruktion



Die „Integration von Halbzeugen“ als Gestaltungsregel bildet die Grundlage für die folgende Optimierung, s. Tab. 13.8.

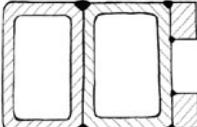
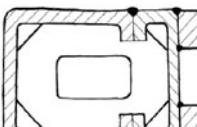
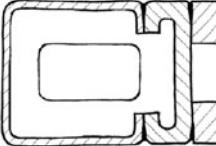
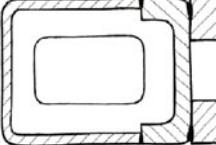
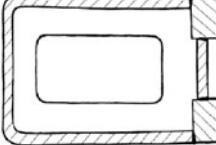
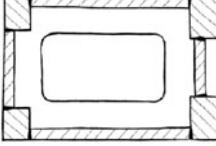
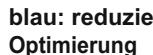
### Schritt 3:

- Integration der Leisten in die Ecken des Balkens,
- Versteifung der Ecken,
- abermalige Gewichtsreduktion und
- Erhöhung des Trägheitsmoments durch Versteifung der beiden anderen Ecken.

## 13.7 Konstruieren von Strukturbau Teilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden (Werner Hufenbach, Olaf Helms)

In vielen Bereichen des modernen Fahrzeugbaus, bei schnelllaufenden Anlagen, Sondermaschinen und Sportgeräten sowie bei Windkraftanlagen kommen neben den klassischen metallischen Werkstoffen zunehmend Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) zur Anwendung. Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften sowie die spezifischen Verarbeitungsmöglichkeiten beider Werkstoffgruppen haben erheblichen Einfluss auf die Produktentwicklung und führen in der Regel zu jeweils anderen konstruktiven Lösungen. Diese Unterschiede spiegeln sich auch in den jeweiligen Konstruktionsmethoden wieder, wobei sich für die effiziente Entwicklung von beanspruchungsgerechten FKV-Bauteilen zunehmend eigene und angepasste Entwurfsstrategien durchsetzen. Hierzu zählen etwa das methodische Planen von Mischbauweisen, die tragwerksbezogene Bauteilsynthese und der interaktive Entwurfsprozess.

**Tab. 13.8** Optimierung des Bauteilgewichts bei konstanter Steifigkeit

Bewegter Balken	Beschreibung	Gestaltungsregel	Gewicht
	<ul style="list-style-type: none"> <li>WIG/MSG verschweißte Rohre (Halbzeuge)</li> <li>angeschweißte Leisten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konstruktion mittels vorhandener Halbzeuge</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>WIG/MSG verschweißte Blechteile mit Rippen</li> <li><math>t_{\text{Blech}} = \text{konst.}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versteifung durch Rippen -&gt; bessere Torsionsbelastung</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>WIG/MSG oder Laser-verschweißte Blechteile mit unterschiedlicher Blechdicke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verringern der Blechdicke an weniger belasteten Stellen des Bauteils</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laserschweißte Blechteile unterschiedlicher Blechdicke im Stumpfstoß</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materialersparnis/ Gewichtsreduktion durch Einsatz von Laserschweißen mit Stumpfstoß</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzung der Leisten zur Eckenversteifung durch Laserschweißen an Blechteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration der Halbzeuge in die Ecken</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versteifung in allen Ecken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhung des Trägheitsmomentes</li> </ul>	
 aktuelle Kosten – 100%  weiß: prozentuale Kostenersparnis  blau: reduzierte Kosten durch Optimierung			



**Abb. 13.62** Typische Prozesskette für die Herstellung einer FKV-Struktur; Infiltration und Konsolidierung im RTM- Verfahren

### 13.7.1 Aufbau und Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden

Für die meisten höher beanspruchten Strukturen und Komponenten des Maschinen- und Fahrzeugbaus haben sich bisher metallische Werkstoffe, wie z. B. Stahl, aufgrund ihrer relativ hohen Steifigkeiten und Festigkeiten bestens bewährt. Die Festigkeit lässt sich jedoch erst durch die Duktilität der Metalle ingenieurtechnisch nutzen. So kommt es etwa in den Bereichen von Kerben und Fehlstellen durch plastisches Fließen zum vorteilhaften Ausgleich von Spannungsüberhöhungen. Die Festigkeit von spröden Werkstoffen, wie z. B. von Gläsern auf Basis von Siliziumdioxyd oder von Kohlenstoff in Form von Graphit, lässt sich wegen der fehlenden Plastizität jedoch kaum für Strukturauteile ausnutzen (Schürmann 2005). Einzelne Fehlstellen wirken hier schnell als Keime für eine globale Rissausbreitung. Durch die Verarbeitung dieser spröden Werkstoffe zu relativ dünnen Fasern (Glasfaser:  $\varnothing 5\text{--}24 \mu\text{m}$ , Kohlenstofffaser:  $\varnothing 5\text{--}10 \mu\text{m}$ ; vergleiche: menschliches Haar:  $\varnothing 60 \mu\text{m}$ ) kann die Fehlstellendichte in diesen Werkstoffen deutlich reduziert werden. Darüber hinaus entsteht durch die Einbettung dieser Fasern in eine Kunststoffmatrix ein Faser-Kunststoff-Verbund (FKV), der ein hohes Maß an Toleranz gegenüber einzelnen Fehlstellen aufweist. Die nachgiebigere Matrix bietet in FKV eine effiziente Rissstopperfunktion, so dass sich einzelne Fehlstellen kaum auf die Bauteilfestigkeit auswirken können. Diese Eigenschaft führt zudem zu relativ hohen Schwingfestigkeiten (Koch 2010).

Um Verstärkungsfasern wie z. B. Glas- oder Kohlenstofffasern im ingenieurtechnischen Maßstab handhaben zu können, werden in der Regel einige tausend Einzelfasern zu Garnen oder Rovings zusammengefasst. Für die Einbettung dieser Faserbündel in Kunststoffmatrizes haben sich verschiedene Urformverfahren etabliert, die je nach gewünschter Gestalt, Faserverstärkung und Stückzahl auszuwählen und anzupassen sind (Flemming et al. 1998). Die Verarbeitung von Fasern und Kunstarzen zu FKV-Bauteilen ist anhand eines Resin-Transfer-Moulding-(RTM-) Verfahrens in Abb. 13.62 exemplarisch dargestellt.

**Tab. 13.9** Ausgewählte Verstärkungsfasern und ihre mechanischen Eigenschaften

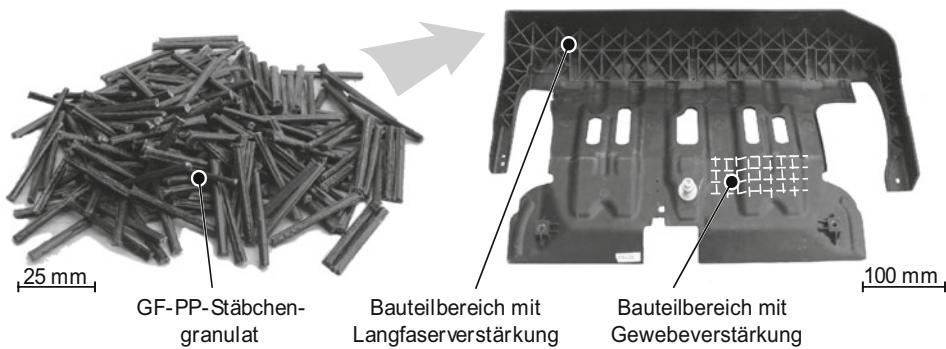
	E-Glasfaser	S-Glasfaser	Kohlenstofffaser	Kohlenstofffaser IMS
Zugfestigkeit MPa	2.400	3.600	4.500	4.000
E-Modul GPa	73	86	230	370

Faser-Kunststoff-Verbunde eignen sich allgemein für die reproduzierbare Herstellung von großen Schalenstrukturen. So etwa lassen sich die Verstärkungsfasern in Form von textilen Halbzeugen vor der Aushärtung der Harzmatrix durch Drapieren und Zuschneiden in weiten Grenzen und mit geringem Kraftaufwand auf die gewünschte Bauteilkontur anpassen. Mit Hilfe von Laminierformen, die häufig auch aus FKV bestehen, lassen sich auf diese Weise endkonturgenaue Flugzeugstrukturen, Windkraft-Rotorblätter und Bootsrümpfe aus glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen in Serie herstellen.

### 13.7.1.1 Verstärkungsfasern für Strukturbauenteile

Für Strukturbauenteile kommen vor allem Glas- und Kohlenstofffasern zur Anwendung (Tab. 13.9). Bei geringen strukturmechanischen Anforderungen werden auch Naturfasern zur Verstärkung eingesetzt. Hochfeste Synthetikfasern wie z. B. Aramid-, Polyethylen- oder PBO-Fasern sind für den Einsatz in biegeschlaffen Zugmitteln, wie etwa Seilen oder Riemern, sowie in Schutzbekleidungen geradezu prädestiniert, für Strukturbauenteile haben diese Fasertypen jedoch eher geringe Bedeutung. Bei Sonderanwendungen mit speziellem thermischem oder medialem Anforderungsprofil kommen ferner Quarz- und Keramikfasern zum Einsatz.

Glasfasern sind in verschiedenen Qualitäten verfügbar, wobei E-Glasfasern für die meisten Anwendungen das günstigste Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen. R- und S-Glasfasern bieten etwas höhere Steifigkeiten und Festigkeiten, sind wegen des höheren Preises jedoch eher bei Sonderanwendungen der Luft- und Raumfahrttechnik zu finden. Glasfasern werden bei höher beanspruchten Bauteilen vor allem als Endlosfaser- oder Textilverstärkung verarbeitet, wobei eine beanspruchungsgerechte Ausrichtung der Fasern angestrebt wird. Die Faserlängen ergeben sich bei solchen Verstärkungen aus den Bauteilabmessungen oder aus der Größe der ausgewählten textilen Halbzeuge und Vorformlinge (Preforms) (Flemming et al. 1998). Derartige glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) eignen sich vor allem für die reproduzierbare Herstellung von großen Schalenstrukturen, wie z. B. von Windrotorblättern oder Bootsrümpfen, mit hoher Formgenauigkeit und Oberflächengüte. Im Automobilbau steht dagegen eine kostengünstige Fertigung mit hohen Taktraten im Vordergrund. Um die effiziente Verarbeitung von Glasfaserverstärkungen mittels Press- oder Schäumtechnik in der Großserienfertigung zu ermöglichen, kommen diese Verstärkungsfasern oft auch als geschnittene Langfasern mit Faserlängen von etwa 20 bis 50 mm zur Anwendung. Geringere Festigkeiten aufgrund der weniger beanspruchungsgerechten Faseranordnung werden dabei in Kauf genommen. In einigen Fällen können Lang- und Endlosfaserverstärkungen in einem Pressbauteil kombiniert werden, um höhere mechanische Eigenschaften mit großem Gestaltungsfreiraum in Einklang zu bringen.



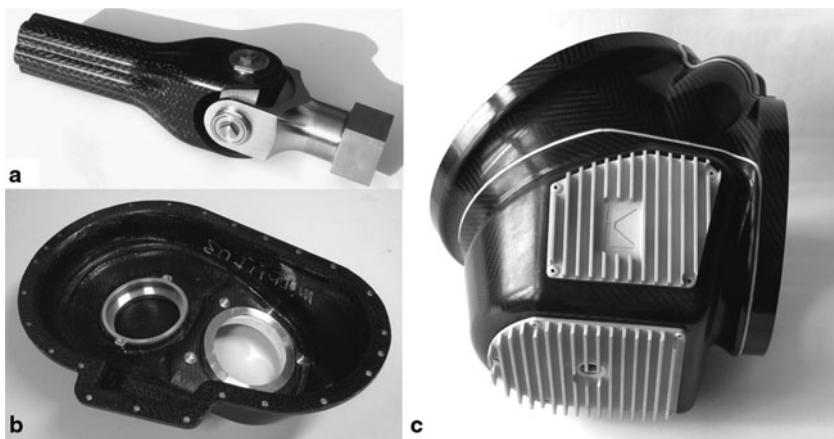
**Abb. 13.63** Stäbchengranulat zur Herstellung von Langfaser-Pressmassen (*links*); thermoplastische PKW-Sitzschale mit Langfaser- und Textilverstärkung (*rechts*)

**Tab. 13.10** Mechanische Kennwerte für ausgewählte Faser-Kunststoff-Verbunde

		GFK E-Glasf. UD-Gelege 60 % vol. [0°]	GFK E-Glasf. Gewebe 50 % vol. [0°/90°/±45°]	CFK HT-Faser UD-Gelege 60 % vol. [0°]	CFK HT-Faser Gewebe 50 % vol. [0°/90°/±45°]
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	2	1,9	1,6
E-Modul	E <sub>1</sub>	GPa	40	15	138
	E <sub>2</sub>	GPa	14	15	8
	E <sub>3</sub>	GPa	14	14	8
G-Modul	G <sub>12</sub>	GPa	4	7	5
Zugfestigkeit	R <sub>m1</sub>	MPa	500	240	2.400
	R <sub>m2</sub>	MPa	80	240	25
	R <sub>m3</sub>	MPa	80	80	25
Dehnlänge	E <sub>1</sub> /(ρ*g)	km	2.040	804	8.790
Reißlänge	R <sub>m1</sub> /(ρ*g)	km	25	13	153
					31

gen. Abbildung 13.63 zeigt exemplarisch eine presstechnisch gefertigte PKW-Sitzschale aus glasfaserverstärktem Polypropylen mit Gewebe- und Langfaseranteilen (Hufenbach et al. 2010). Mechanische Kennwerte für ausgewählte GFK-Konfigurationen sind in Tab. 13.10 angegeben.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe kommen nicht nur wegen ihrer guten Formgebungsmöglichkeiten sondern vielmehr wegen ihrer hervorragenden spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten zunehmend für Hochleistungsbauteile zum Einsatz (s. Tab. 13.10). Im Flugzeugbau werden nicht mehr nur große Schalenstrukturen für Rümpfe, Tragflächen und Leitwerke als Einsatzgebiete für CFK betrachtet. Aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks richtet sich der Blick zunehmend auch auf komplexere Systemkomponenten, wie



**Abb. 13.64** Hochleistungsbauteile in CFK-Metall-Mischbauweise: **a** Kardangelenk (Hufenbach et al. 2007), **b** Hubschrauber-Getriebegehäuse mit Lagersitzen, **c** Getriebegehäuse mit integrierten metallischen Kühlkörpern (Hufenbach et al. 2009)

etwa Hydraulikkomponenten, Fahrwerksbauteile, Antriebswellen und Getriebegehäuse (s. Abb. 13.64). Weitere Einsatzgebiete für CFK sind im Sportgerätebau und zunehmend auch im Maschinen- und Anlagenbau zu finden. Hierzu zählen Komponenten für schnelllaufende Anlagen wie etwa CFK-Walzen für Papiermaschinen.

### 13.7.1.2 Polymere Matrixwerkstoffe

Polymere Matrixwerkstoffe können grob in Duroplaste und Thermoplaste gegliedert werden, wobei in beiden Gruppen teurere Hochleistungswerkstoffe und einfache Materialien für Massenanwendungen zu finden sind. Wesentliche Qualitätsmerkmale von Matrixwerkstoffen sind eine hohe Bruchdehnung, die deutlich über der Bruchdehnung der Faserverstärkung liegen sollte, eine hohe Schub- und Haftfestigkeit zur Gewährleistung ausreichender Zwischenfaser-Kennwerte sowie günstige Verarbeitungsparameter.

Für das Infiltrieren von Endlosfaser- und Textilverstärkungen sind niedrig viskose Kunstharze prädestiniert, die in der Regel durch chemische Reaktionen zwischen mehreren Harzkomponenten (bei Epoxidharzen z. B. Harz, Härter und Beschleuniger) zu duroplastischen Kunststoffen aushärten. Im Allgemeinen kommen die hochwertigeren Fasern auch mit den leistungsfähigeren Matrixsystemen zur Anwendung. So etwa werden Kohlenstofffasern vor allem mit Epoxidharzen kombiniert, während Glasfaser verstärkungen häufig auch in preiswerteren Polyesterharzen eingebettet werden.

In Kombination mit geschnittenen Glasfaser verstärkungen eignen sich Duroplaste auch für das Pressen oder Schäumen von Serienbauteilen. Für die presstechnische Fertigung von FKV-Bauteilen haben sich vor allem Langglasfaser-Polyester-Mischungen bewährt, die zunächst zu zäh-elastischen, tafelartigen Vorprodukten (Sheets) verarbeitet werden. Die presstechnische Formgebung und Aushärtung dieser Vorprodukte wird als Sheet-Moulding-Compound-(SMC-)Verfahren bezeichnet. Für das Schäumen von

Leichtbaustrukturen kommen vor allem Langglasfasern in Kombination mit Polyurethan-Systemen zur Anwendung (Langfaser-Injektion – LFI).

Thermoplastische Matrices werden nur selten als Reaktionsharz verarbeitet. Die Verarbeitung erfolgt vielmehr rein physikalisch durch Aufschmelzen, Formgeben und erneutes Erstarren beim Abkühlen. Durch das Aufschmelzen werden jedoch kaum geeignete Viskositäten für das Infiltrieren einer Endlosfaser- oder Textilverstärkung erzielt. Bewährt haben sich hingegen Verfahren, bei denen thermoplastischer Kunststoff in Form von Folien, Fasern oder Pulver flächig und räumlich in der Faserverstärkung verteilt wird. Für die gleichmäßige Verteilung kommt z. B. das Hybridgarn-Spinnen zur Anwendung, bei dem thermoplastische Fasern und Verstärkungsfasern mit einem geeigneten Faser-Matrix-Verhältnis im festen Zustand zusammengeführt und vermischt werden. Die Bauteilfertigung erfolgt dann etwa durch Erwärmen, Pressen und Abkühlen eines Hybridgarn-Textil-Thermoplast-(HGTT-)Halbzeugs oder –Preforms (Hufenbach 2008). Für Hochleistungsbauten in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der chemischen Verfahrenstechnik kommen hochwertige PEEK- oder PPS-Matrices mit Kohlenstofffaserverstärkungen zur Anwendung. Dagegen sind im Automobilbau eher preiswertere Kombinationen von Glasfasern und PP zu finden. Mit geschnittenen Fasern lassen sich derartige Werkstoffkombinationen auch presstechnisch in großer Serie verarbeiten, wobei Vorprodukte wie z. B. Extrusionsmassen oder Organobleche mit Lang- und Endlosfaserverstärkung zum Einsatz kommen (s. Abb. 13.63). In der Tab. 13.11 sind ausgewählte Faser-Kunststoff-Verbunde und typische Anwendungsfelder wiedergegeben.

### 13.7.2 Konzipieren und Entwerfen von Faserverbundstrukturen

Bei der Entwicklung von Hochleistungsbauteilen aus GFK und CFK stellt sich die Frage nach einer geeigneten methodischen Vorgehensweise, mit der die vorteilhafte Ausnutzung der sehr speziellen mechanischen und herstellungstechnischen Werkstoffeigenschaften gewährleistet wird. Viele Hinweise können bereits dem produktneutral formulierten Konstruktionsprozess nach Teil 1 entnommen werden. Auch die in Abschn. 12.2.1 angegebenen Gestaltungsprinzipien hinsichtlich des Kraftflusses geben eine Orientierung. Darüber hinaus haben sich bereits einige faserverbundspezifische Methoden bewährt und etabliert.

#### 13.7.2.1 Gezielte Werkstoffauswahl für Leichtbaustrukturen in Mischbauweise

Nur selten wird vom Kunden oder vom Endanwender die Verwendung eines bestimmten Werkstoffs gefordert. Die Auswahl von Werkstoffen ist vielmehr Bestandteil des Konstruktionsprozesses und richtet sich nach den geforderten Funktionen und den Kostenzielen. Um mehrere Funktionen effizient und kostengünstig in einem Produkt vereinigen zu können, werden Bauteile und Baugruppen oft aus mehreren Werkstoffen aufgebaut. Somit entstehen Mischbauweisen mit „dem richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle zum richtigen Preis“. Wegen des relativ speziellen Eigenschaftsprofils und wegen der zum Teil hohen

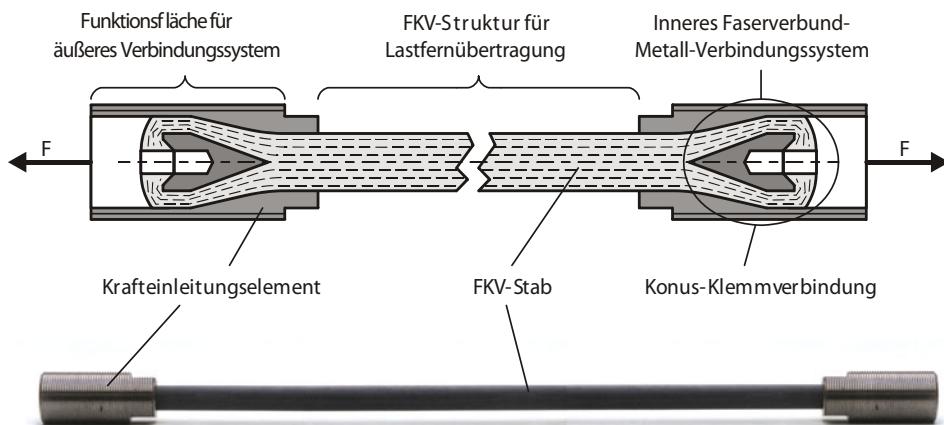
**Tab. 13.11** Ausgewählte Faser-Kunststoff-Verbunde und typische Anwendungsfelder

	Glasfaser (GF) Langfaser verstärkung	Glasfaser (GF) Endlosfaser- und Textilverstärkung	Kohlenstofffaser (CF) Endlosfaser- und Textilverstärkung
Thermoplastische Matrices			
PP, PA	Strukturen und Verkleidungen für PKW, LKW und Baumaschinen	Strukturen und Verkleidungen für PKW, LKW und Baumaschinen	Untypische Kombination
PEEK, PPS	Untypische Kombination	Untypische Kombination	Sonderlösungen in der Luft- und Raumfahrttechnik, Hochleistungsbauteile in der chemischen Verfahrenstechnik, medizintechnische Implantate
Duroplastische Matrices			
PUR	Verkleidungsbauteile, Skier, (häufig in Kombination mit Dekorfolien)	Untypische Kombination	Untypische Kombination
UP	Strukturen und Verkleidungen für PKW, LKW und Baumaschinen sowie Elektrogehäuse und Schaltkästen	Windkraft-Rotorblätter, Bootsrumpfe, Frontverkleidungen für Eisenbahnen, Maschinengehäuse	Untypische Kombination
EP	Untypische Kombination	Windkraft-Rotorblätter, Bootsrumpfe	Strukturen und Verkleidungen für Luft- und Raumfahrzeuge sowie für Sportgeräte und Sportfahrzeuge, Leichtbaustrukturen für Sondermaschinen

PEEK Polyetheretherketon, PPS Polyphenylensulfid, PA Polyamid, PP Polypropylen, PUR Polyurethan, UP Ungesättigtes Polyesterharz, EP Epoxidharz

Werkstoffkosten kommen Faser-Kunststoff-Verbunde zumeist in Kombination mit anderen Werkstoffen, wie z. B. Metallen, zur Anwendung (Helms 2006).

Neben wirtschaftlichen Aspekten erfolgt die Werkstoffzuordnung vor allem nach funktionalen Gesichtspunkten. Endlosfaser- und textilverstärkte Kunststoffe eignen sich vor allem für Tragwerke, mit denen äußere, klar definierte Lasten über größere Abstände zu übertragen sind. Bei derartigen Tragwerken können durch eine beanspruchungsrechte Abstimmung von Gestalt und Faserorientierungen hohe Leichtbaugrade erzielt werden. Für tribologisch hochbeanspruchte Funktionsflächen, wie z. B. Gleit-, Lauf- und Dichtflächen, sind Faserverbundwerkstoffe jedoch weniger geeignet, da die relativ



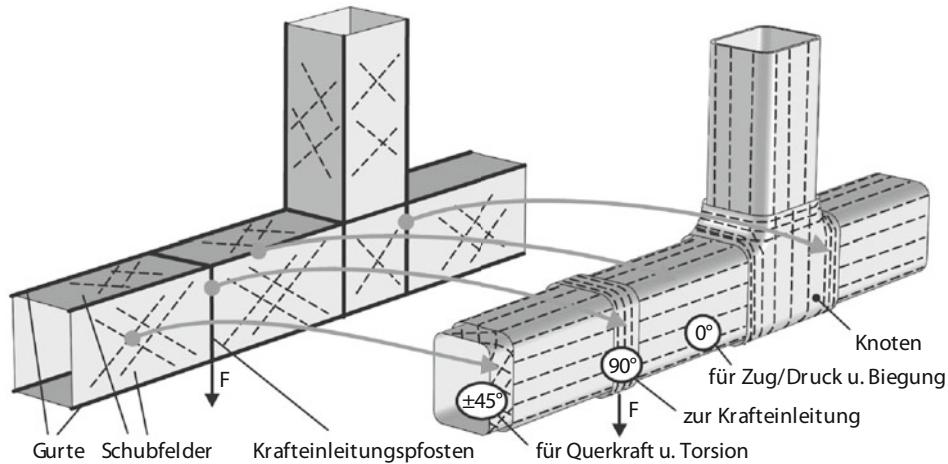
**Abb. 13.65** Leichtbau-Zugstab in Faserverbund-Metall-Mischbauweise (Hufenbach et al. 2005a)

geringe Abriebfestigkeit der Matrix in Kombination mit den abrasiv wirkenden Fasern schnell zum Funktionsverlust führt. Für die Gewährleistung von tragfähigen Funktionsflächen sind daher Funktionselemente zu gestalten, die z. B. aus metallischen Werkstoffen bestehen können. Um eine funktions- und beanspruchungsgerechte Mischbauweise zu erzielen, werden zudem Fügesysteme benötigt, die eine feste Verbindung von Faserverbund-Tragstruktur und metallischen Funktionselementen gestatten. Die Konzeption einer derartigen Faserverbund-Metall-Mischbauweise lässt sich am Beispiel eines hochfesten Leichtbau-Zugstabs verdeutlichen (s. Abb. 13.65). Bei dieser Struktur übernimmt ein FKV-Stab mit unidirektonaler Faserorientierung die Lastfernübertragung, während für die Lasteinleitung metallische Gewindeelemente vorgesehen sind. Ein inneres formschlüssig wirkendes Verbindungssystem mit Konuskontur gestattet eine werkstoffgerechte Übertragung der axialen Lasten vom metallischen Funktionselement zur FKV-Struktur.

Die Konstruktion einer Leichtbaustruktur in Mischbauweise kann somit etwa in die Synthese der Faserverbundstruktur, die Synthese der metallischen Funktionselemente und die Synthese der zugehörigen Fügesysteme gegliedert werden.

### 13.7.2.2 Tragwerksbezogene Bauteilsynthese

Die Gestaltung einer Struktur in Faserverbund-Leichtbauweise beginnt in der Regel mit der zumindest vorläufigen Festlegung von repräsentativen Lastfällen, Bauräumen und Kraftangriffspunkten. Darauf aufbauend kann die Synthese eines Tragwerkskonzepts für einen ersten Lastfall im verfügbaren Bauraum durchgeführt werden. Dabei sind grundlegende Tragwerkselemente, wie z. B. Stäbe, Gurte und Schubfelder, zusammenzufügen, so dass eine Lastübertragung gewährleistet ist (s. Abb. 13.66). Für weitere Lastfälle sind möglicherweise zusätzliche Elemente vorzusehen. Stäbe, Gurte und Schubfelder sind für die Konzeption eines Faserverbund-Tragwerks prädestiniert, da hier klare Faserorientierungen zugewiesen werden können. Stäbe und Gurte übertragen Längskräfte am besten



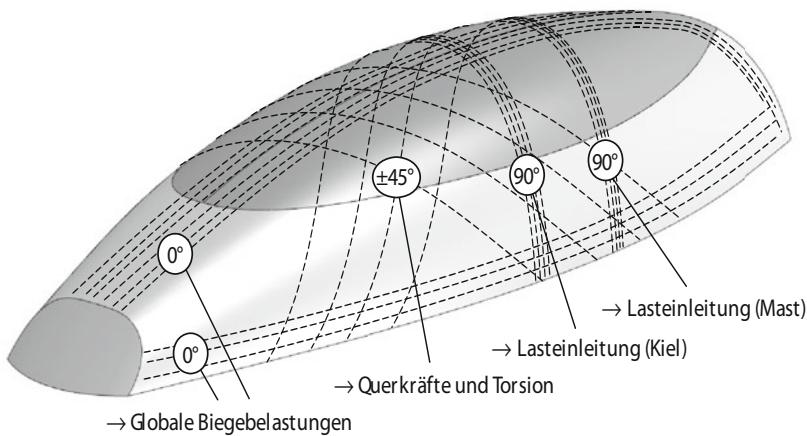
**Abb. 13.66** Konzeption eines Faserverbundtragwerks mit beanspruchungsgerechten Faserorientierungen: räumlicher Schubfeldträger (*links*) und daraus abgeleitetes Rahmentragwerk (*rechts*)

mit axialen ( $0^\circ$ -)Verstärkungen, während sich Schubfelder mit  $\pm 45^\circ$ -Verstärkungen beanspruchungsgerecht ausführen lassen. Um bei komplexeren räumlichen Tragwerken die Zahl der Einzelemente überschaubar zu halten, werden oft Gurte und Schubfelder zu Rahmenelementen zusammengefasst (Space-Frame, s. Abb. 13.66).

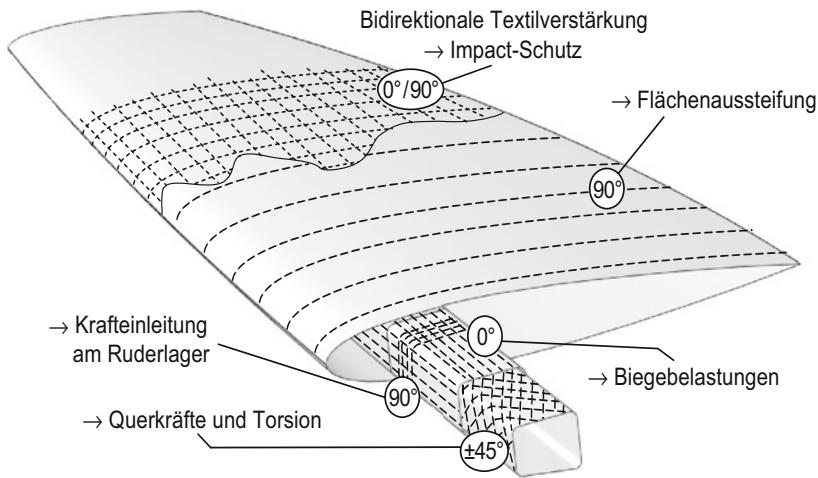
Neben Rahmentragwerken spielen Schalentragwerke eine bedeutende Rolle in der Faserverbundtechnik, da hiermit nicht nur die Übertragung von Lasten, sondern auch die Erfüllung von strömungsmechanischen Funktionen ermöglicht wird. Dementsprechend sind Faserverbund-Schalentragwerke bei Boots- und Flugzeugrümpfen sowie Tragflächen, Leitwerken, Rudern und Rotorblättern zu finden. Offene und unverzweigte Schalenstrukturen gelten zudem als besonders faserverbundgerecht, da sich derartige Komponenten zumeist effizient aus textilen Flächenhalbzeugen aufbauen lassen (s. Abb. 13.67).

Tragflächen, Windrotorblätter und Ruder entstehen häufig als kombinierte Tragwerke mit einem zentralen Rahmenelement (Holm oder Schaft) und einer strömungsgünstigen Verkleidung. Die verkleidende Schale nimmt hierbei Strömungskräfte auf und leitet diese auf kurzem und direktem Weg in die Rahmenstruktur weiter. Globale Beanspruchungen werden somit vor allem durch das Rahmenelement aufgenommen (s. Abb. 13.68).

Auf Basis des Tragwerkskonzepts erfolgt eine Vordimensionierung derart, dass den noch querschnittslosen Stäben, Gurten und Feldern Querschnitte und Wandstärken zugewiesen werden können. Vor allem bei längeren Kraftübertragungswegen sind dabei häufig die globalen Steifigkeits- oder Stabilitätsanforderungen maßgeblich. Bei einfacheren Tragwerken bieten sich analytische Berechnungsmodelle an, mit denen schnell Parameterstudien durchgeführt werden können. Bei komplexeren Tragwerken ist hingegen der Aufbau eines abstrahierten Finite-Elemente-Modells, etwa mit Schalen- und Balkenelementen zu empfehlen. Diese Vordimensionierung führt zu einem Tragwerksmodell, das

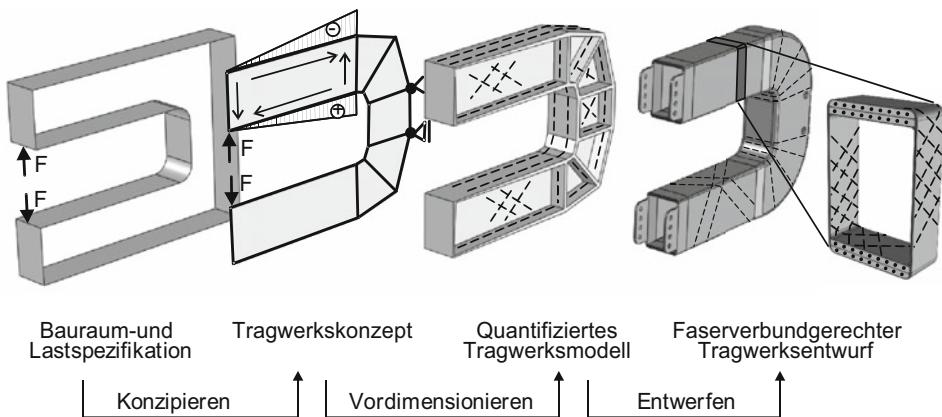


**Abb. 13.67** Konzeption eines Faserverbundaufbaus für einen Yachtrumpf



**Abb. 13.68** Konzeption eines Faserverbund-Tragwerks aus Schalen- und Rahmenelementen am Beispiel eines Yachtruders

die Tragwerkselemente schon als Volumenkörper darstellt. Über den Zusammenhalt dieser Volumenkörper gibt dieses Tragwerksmodell jedoch noch keine Auskunft. Der bei der Tragwerkskonzeption angenommene ideale Zusammenhalt der einzelnen Tragwerkselemente muss vielmehr in der weiteren Entwurfsphase durch konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden. So sind etwa Gurte und Schubfelder durch eine Überlappung oder Umschlingung der jeweiligen Faserlagen fest zu verbinden. Durch eine feine wechselse-

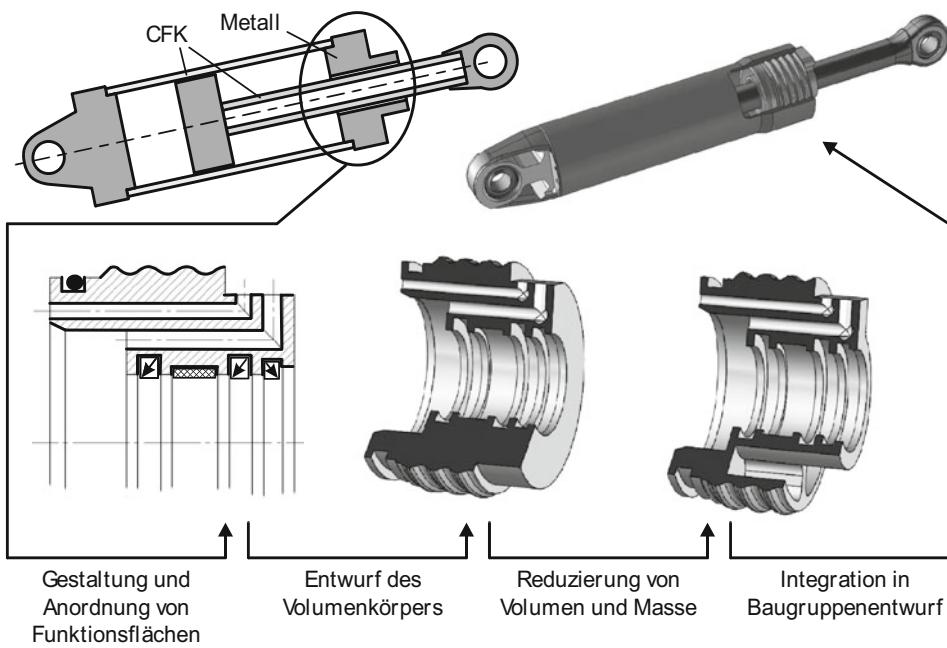


**Abb. 13.69** Methodisches Vorgehen bei der Synthese von Tragwerken in Faserverbund-Leichtbauweise am Beispiel einer Zangenstruktur

de Schichtung der Faserverstärkungen werden zudem sehr große „Klebflächen“ zwischen den Tragwerkselementen erzielt. Abbildung 13.69 zeigt die bewährte Vorgehensweise zur tragwerksbezogenen Bauteilsynthese am Beispiel einer Leichtbau-Fügezange.

### 13.7.2.3 Funktionsflächen-bezogene Bauteilsynthese

Die für beanspruchungsgerechte Mischbauweisen benötigten metallischen Funktionselemente sind vor allem durch ihre Funktionsflächen gekennzeichnet, die auf engem Bauraum zueinander anzuordnen sind. Komplexe Funktionselemente sind z. B. bei Leichtbau-Hydraulikzylindern zu finden, wie sie etwa am Institut für Leichtbau entwickelt und erprobt werden (s. Abb. 13.70). Während es bei Dichtflächen auf höhere Oberflächenqualitäten und Verschleißfestigkeiten ankommt, dienen die Montageflächen zur Aufnahme hoher äußerer Lasten. Da die Lastübertragungswege jedoch relativ kurz sind, ist das Konzipieren von speziellen Tragwerken kaum erforderlich. Beim Entwurf von Funktionselementen wird vielmehr versucht, eine kompakte und funktionelle Anordnung der Funktionsflächen zu erzielen. Eine so gewonnene Funktionsflächen-Konfiguration lässt sich zumeist durch Hinzufügen weiterer Bauteilflächen zu einem vorläufigen Volumenkörper ergänzen (vgl. Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen in Albers 2002). Die Tragfähigkeit des entstandenen Körpers wird anschließend durch einfache Festigkeitsberechnungen oder Finite-Elemente-Simulationen kontrolliert. Ergeben sich dabei größere Festigkeitsreserven, so lassen sich noch verbliebene Leichtbaupotenziale ausschöpfen. Die Reduzierung von Bauteilvolumen und Massen erfolgt zumeist durch die Gestaltung von geeigneten Aussparungen, wobei auch fertigungstechnische Restriktionen zu berücksichtigen sind.

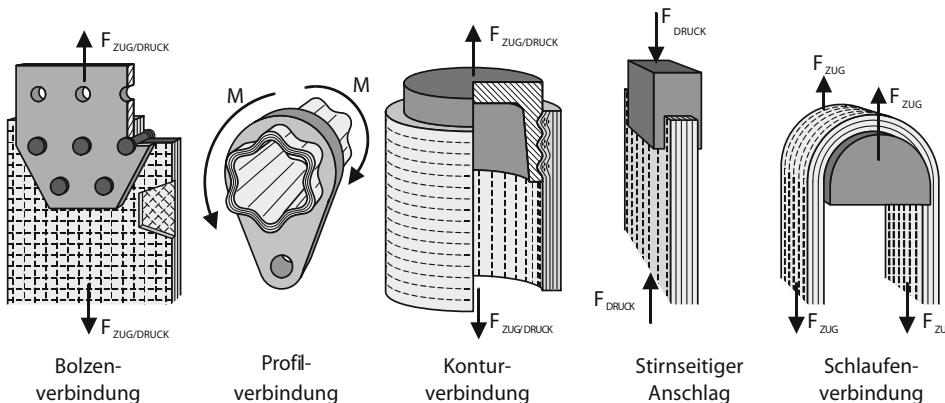


**Abb. 13.70** Methodisches Vorgehen bei der Synthese von metallischen Funktionselementen

### 13.7.2.4 Synthese von Verbindungstechniken für Mischbauweisen

Technisch und wirtschaftlich interessante Mischbauweisen setzen nicht nur einen festen Zusammenhalt von Faserverbundstrukturen und metallischen Funktionselementen voraus, sondern erfordern auch reproduzierbare, montagefreundliche Fügetechniken. Das Kleben gilt weithin als besonders faserverbundgerechte Fügetechnik, da sich Lasten über günstig angeordnete Klebeflächen relativ gleichmäßig in Faserverbundstrukturen einleiten lassen. Die vergleichsweise niedrigen Festigkeiten von Klebstoffen führen jedoch oft zu relativ großen Klebeflächen, die bei vielen Hochleistungsbauteilen kaum verfügbar sind. Als Nachteile der Klebtechnik erweisen sich zudem die häufig aufwändige Oberflächen-Vorbehandlung und die Klebstoffverarbeitung. Auch die Qualitätssicherung bei der klebtechnischen Montage und die Überwachung im Nutzungszeitraum stellen besondere Herausforderungen dar. Gut reproduzierbare und zugleich bauraumeffiziente Lösungen für die Einleitung von hohen Lasten in Faserverbundstrukturen können hingegen oft mit den in Abb. 13.71 dargestellten formschlüssigen Prinzipien erzielt werden.

Bolzenverbindungen haben sich für das Fügen von Faserverbundstrukturen etwa im Flugzeugbau oder für die Nabenanbindung von Windkraft-Rotorblättern bestens bewährt, da gebohrte Löcher in Laminaten mit etwa quasi-isotroper Verstärkung sehr hohe Lochleistungsfestigkeiten aufweisen. Vorteilhaft ist zudem der Einsatz von textilen Verstärkungen, da sich hiermit ein Risswachstum wirkungsvoll unterbinden und ein gutmütiges Versagen erzielen lässt. So etwa lassen sich mit Kohlenstofffaser-Gewebeverstärkungen statische

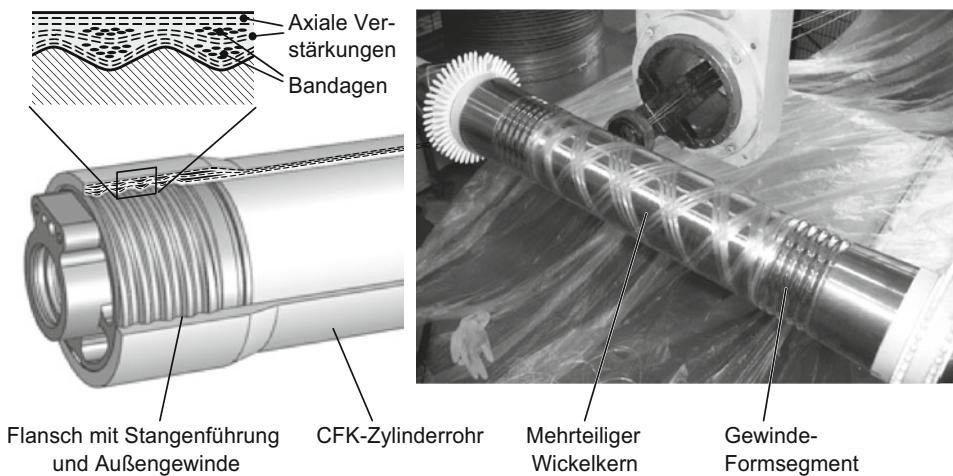


**Abb. 13.71** Bewährte formschlüssige Prinzipien zur Lasteinleitung bei FKV-Strukturen

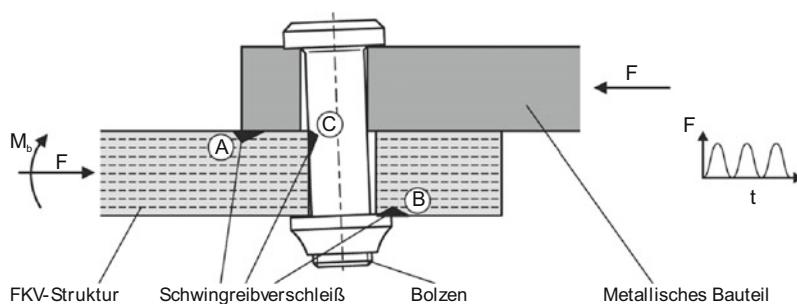
Lochleibungsfestigkeiten von über 500 MPa erzielen, womit mindestens das Festigkeitsniveau hochwertiger Aluminiumlegierungen erreicht wird. Bolzenverbindungen sind vor allem bei der Gestaltung von Schalenstrukturen relativ einfach einzuplanen, da neben geeigneten Laminataufbauten in den Fügezonen lediglich ebene Flächen für Bohrmuster vorzusehen sind.

Für Lasteinleitungen bei stab- und rohrförmigen FKV-Bauteilen bieten faserverbundgerechte Profil- und Konturverbindungen deutliche Vorteile, wobei diese Prinzipien noch wenig industrielle Verbreitung gefunden haben. Das Prinzip der Drehmomentübertragung mittels Profilverbindung ist aus dem klassischen Maschinenbau bekannt, wobei die für metallische Werkstoffe bewährten Zahn-Profile kaum auf Faserverbundstrukturen zu übertragen sind. Am ILK konnten auf Basis von verschiedenen Fertigungs- und Belastungsversuchen geeignete Profilgeometrien und Faserverstärkungen ermittelt werden (Hufenbach et al. 2007). Wirtschaftlich interessant werden Profilverbindungen z. B. für modulare Antriebswellen, wobei mit dem Pultrusionsverfahren die Möglichkeit einer kostengünstigen Endlosfertigung besteht.

Mit Hilfe von faserverbundgerechten, umlaufenden Formelementen lassen sich hohe axiale Lasten formschlüssig in stab- und rohrförmige Bauteile einleiten. So etwa kann ein zylindrischer Faserverbundstab am Ende mit einer konusförmigen Aufweitung ausgestattet werden, um hohe Zuglasten formschlüssig aufzunehmen (s. Abb. 13.65). Für die Einleitung von Längskräften in einen Faserverbund-Hydraulikzylinder wurde am ILK ein faserverbundgerechtes Rohrgewinde entwickelt, das dem gleichen mechanischen Prinzip folgt (s. Abb. 13.72). Der Formschluss entsteht bei diesen Konturverbindungen zwischen etwa axial orientierten Faserlagen, die an der Bauteiloberfläche den Konus- oder Gewindekonturen folgen, und dem hier eingreifenden metallischen Lasteinleitungselement. Um ein Kollabieren der Konturen infolge der sehr hohen Flankenpressungen zu vermeiden, sind die Konturen auszusteifen, wofür Spreizkörper bzw. innere tangentiale Faserlagen eingesetzt werden (Helms 2006; Hufenbach et al. 2005b).



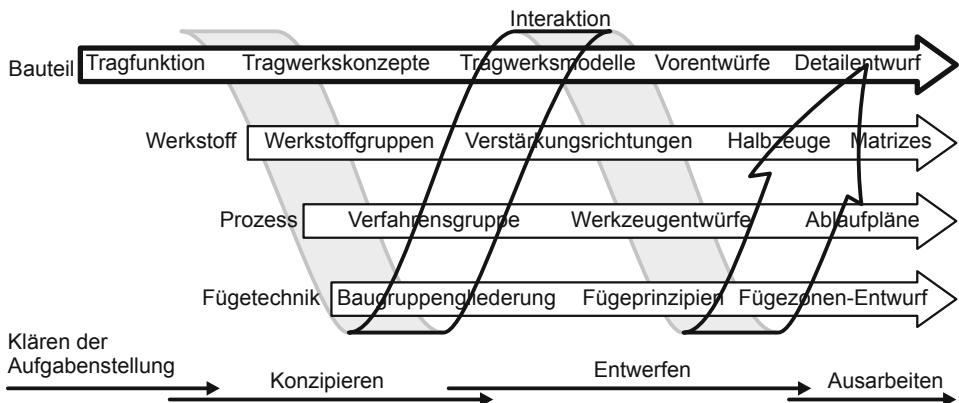
**Abb. 13.72** Aufbau und Fertigung eines beanspruchungsgerechten Faserverbund-Rohrgewindes



**Abb. 13.73** Bolzenverbindung bei einer FKV-Metall-Mischbauweise sowie durch Schwingreibverschleiß gefährdete Bauteilbereiche

Ein Nachteil von Verbindungen ohne stoffschlüssige Traganteile ist in den Relativbewegungen zu sehen, die sich unter Last aus den unterschiedlichen Bauteildeformationen im Kontaktbereich ergeben. Vor allem bei wechselnden Lasten können diese Relativbewegungen zu einem festigkeitsmindernden Schwingreibverschleiß führen (s. Abb. 13.73). So etwa graben sich die relativ harten metallischen Funktionselemente leicht in die Laminat-oberflächen ein, wobei die Kunststoffmatrix und die Faserverstärkungen geschädigt werden (s. Abb. 13.73A, B). Im Bereich von Lochleibungen und Bauteilrändern können zudem abrasiv wirkende Faserenden zu Verschleißvorgängen an metallischen Bauteilen führen (s. Abb. 13.73C).

Durch hohe Bauteilstifigkeiten im Fügebereich, durch eine gezielte Abstimmung der Verformungen sowie durch Vermeidung von rauen oder scharfkantigen Montagezonen kann einem Schwingreibverschleiß konstruktiv begegnet werden. Um die Zuverlässigkeit



**Abb. 13.74** Interaktive Vorgehensweise bei der Konstruktion einer Leichtbaustruktur in Faserverbund-Metall-Mischbauweise

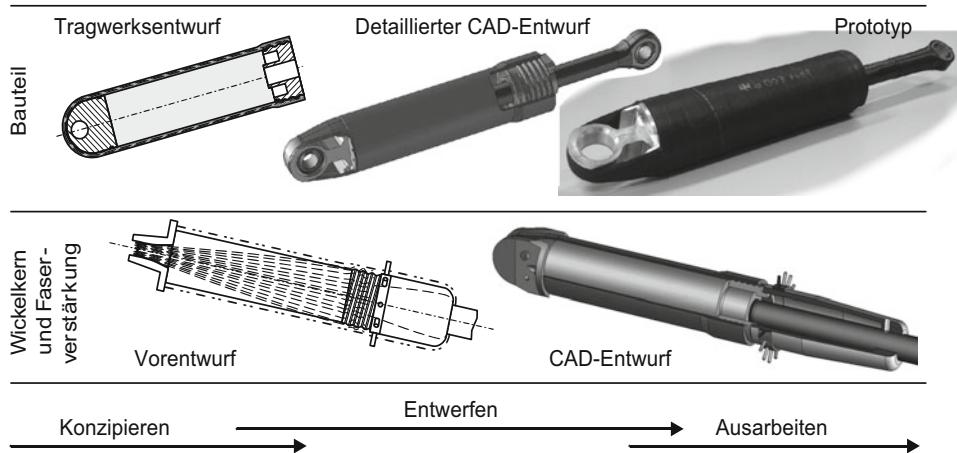
einer Verbindung gewährleisten zu können, sind zudem dynamische Belastungsversuche während der Produktentwicklung sowie Inspektionen in der Einsatzzeit zu empfehlen. Bei der Inspektion zeigen lösbar formschlüssige Verbindungssysteme wiederum deutliche Vorteile gegenüber stoffschlüssigen Verbindungen.

### 13.7.2.5 Übergang vom iterativen zum interaktiven Entwurf

Im klassischen Maschinenbau haben sich allgemeine Konstruktionsprozesse mit den vier Hauptphasen „Klären der Aufgabenstellung“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ bewährt, wobei nacheinander informative, prinzipielle, gestalterische sowie fertigungstechnische Festlegungen getroffen werden. Durch iteratives Vorgehen können dabei z. B. fertigungstechnische Festlegungen in der vorhergehenden Entwurfsphase Berücksichtigung finden.

Bei der Konstruktion einer Leichtbaustruktur in Faserverbund-Metall-Mischbauweise ist eine stimmige Einheit aus Funktion, Bauteilstadt, Werkstoff, Fertigungsprozess und Fügetechnik zu erarbeiten, die mit einer iterativ geprägten Vorgehensweise jedoch kaum zu realisieren ist. Dagegen bewährt sich eine interaktive Vorgehensweise, bei der schon in frühen Arbeitsphasen Faserverstärkungen, Formwerkzeuge und Fügetechniken konzipiert und parallel zur Bauteilstadt entwickelt werden (s. Abb. 13.74).

Diese interaktive Vorgehensweise kommt beispielsweise für die Entwicklung von Leichtbau-Hydraulikzylindern vorteilhaft zum Einsatz. Um den hohen Innenüberdruck und die axialen Kräfte aufnehmen zu können, werden tangentiale und axiale Faserorientierungen vorgesehen. Darüber hinaus sind metallische Flanschbauteile und zugehörige Lasteinleitungszonen einzubetten. Für die formschlüssige Aufnahme dieser Flanschbauteile kommen z. B. ein Faserverbund-Rohrgewinde und eine integrierte Schlaufe zur Anwendung. Abbildung 13.75 verdeutlicht die interaktive Entwicklung der Zylinderbaugruppe und des zugehörigen Wickelkerns.



**Abb. 13.75** Interaktive Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Leichtbau-Hydraulikzylinders

Auch bei der CAD-Modellierung von Faserverbundstrukturen kann ein interaktives Vorgehen dem effizienten Konstruktionsprozess dienen. So etwa bietet es sich an, zunächst die Werkzeugoberflächen zu modellieren. Eine assoziative Kopie dieser Fläche wird zum Faserverbundbauteil vervollständigt, beispielsweise indem – ähnlich einem Laminierprozess – durch einseitiges „Aufdicken“ ein Volumenkörper erzeugt wird. Anschließend werden weitere „Features“ für die spanende Endbearbeitung des Verbundbauteils ergänzt. Eine weitere Kopie des ursprünglichen Flächenmodells lässt sich zum Werkzeug-Modell erweitern und eignet sich als Ausgangsbasis für die CNC-Fertigung der Laminierform.

### 13.8 Ergonomisch (Christopher Schlick)

Der Begriff „Ergonomie“ setzt sich zusammen aus den griechischen Begriffen für Arbeit und Gesetz. Dies verdeutlicht, dass sich die Ergonomie im Wesentlichen mit den Eigenschaften, Fähigkeiten und Bedürfnissen des arbeitenden Menschen wissenschaftlich auseinandersetzt sowie die Wechselwirkungen zwischen Mensch und technischem Erzeugnis untersucht und in Form von Gesetzmäßigkeiten und Regeln beschreibt. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Ergonomie kann durch eine methodisch geleitete Gestaltung

- eine Anpassung des technischen Erzeugnisses an den Menschen,
- aber auch durch Auswahl der Person – beispielsweise auf Basis ihrer Qualifikation und ihres Übungsgrads – eine angemessene Anpassung des Menschen an das Erzeugnis und die damit verbundenen Betriebsprozesse

erreicht werden (Luczak und Volpert 1997; VDI-Richtlinie 2242 1986). Diese Betrachtung erstreckt sich auf den gesamten Gebrauchsverlauf technischer Erzeugnisse mit der Arbeit. Dies beinhaltet beispielsweise den Gebrauch von handgeförderten Werkzeugen und Vorrichtungen in der flexiblen Fertigung ebenso wie nach neuerer Auffassung auch die Arbeit im Haushalt und in der Freizeit.

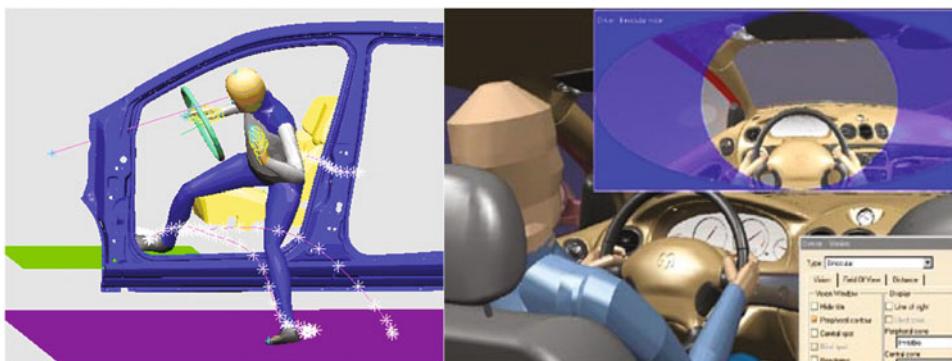
Die technischen Entwicklungen bedingten in den letzten Jahren eine Verlagerung des ursprünglichen Schwerpunktes der Ergonomie von der Gestaltung und Bewertung kraftbetonter Arbeitsaufgaben in der Produktion hin zur informatorischen Arbeit, wie sie vorrangig in der Produktentwicklung anzutreffen ist. Um dieser Tatsache Rechnung tragen zu können, wurden neue Normen und Richtlinien zur Gestaltung der Arbeitsumgebung wie z. B. hinsichtlich der Lärmbelastung oder den klimatischen Bedingungen (VDI-Richtlinie 2242 1986, DIN 33403), aber auch der Arbeitssysteme, wie z. B. zu einer benutzergerechten Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen (VDI/VDE-Richtlinie 3850) oder interaktiver Softwaresysteme (DIN 9241-210) entwickelt. Der steigende Wert einer ergonomischen Produkt- und Prozessgestaltung zeigt sich in der zunehmenden Einbindung ergonomischer Aspekte in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Hierzu werden – wie allgemein in der Konstruktion – verstärkt rechnergestützte Hilfsmittel (Landau et al. 1997; Mühlstedt et al. 2008) konzipiert, entwickelt und eingesetzt. Mit ihnen werden neben dem Einsatz des fertigen Produktes auch die Produktionsprozesse hinsichtlich ergonomischer Kriterien untersucht und gestaltet.

### 13.8.1 Ergonomische Grundlagen

Der Mensch kann in einem technischen System in unterschiedlicher Weise wirken oder von Wirkungen betroffen sein. Für die ergonomische Analyse sind daher die Belastung, die Beanspruchung und die Ermüdung zu unterscheiden. Die Belastung umfasst alle Wirkungen des Arbeitssystems und der Arbeitsumgebung auf den Menschen und benennt damit die von außen wirkenden Einflüsse. Sie führt beim Menschen bedingt durch seine individuellen Gegebenheiten durch Alter, Geschlecht, körperliche Konstitution, Gesundheitszustand oder Übungsgrad zu einer Beanspruchung. Als Folge der Beanspruchung kann sich je nach Beanspruchungsart, -intensität und -dauer Ermüdung einstellen, die durch Erholung wieder ausgeglichen werden kann. Ermüdungsähnliche Zustände wie Monotonie sind dagegen nicht durch Erholung, sondern z. B. durch Tätigkeits- bzw. Belastungswechsel kompensierbar. Für den Konstrukteur ist es zweckmäßig, in diesem Zusammenhang die nachfolgend genannten drei Aspekte zu vergegenwärtigen.

#### 13.8.1.1 Anthropometrie und biomechanische Aspekte

Unter der Anthropometrie versteht man die Lehre von den Maßen, Massen, Kräften, Maßverhältnissen und der Vermessung des menschlichen Körpers. Alle anthropometrischen Maße werden am unbekleideten Menschen an definierten Messpunkten abgenommen. Die Körpermaße werden – zumindest für die Bevölkerung in Deutschland – in der DIN 33402



**Abb. 13.76** Anwendung von digitalen Menschmodellen zur Beurteilung der Körperbewegung beim Einstieg in einen PKW oder der Erreichbarkeit von Stellteilen (*links:* Ramsis (Human Solutions); *rechts:* Human Builder (Dassault Systems; Mühlstedt et al. 2008))

tabellarisch zusammengestellt und können verwendet werden, um Produkte und Produktionsprozesse ergonomisch zu gestalten. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass gegenüber den in der Norm ausgewiesenen Daten aus dem Jahre 1980 aktuelle Reihenmessungen im Rahmen des Projektes „Size Germany“ (2009) eine Zunahme der Körperhöhe (Frauen 1,0 cm; Männer 3,2 cm) und des Körperumfanges belegen. Solche anthropometrischen Tabellen geben die Körpermaße mit Hilfe von Perzentilwerten statistisch an. Diese stellen dar, wie viel Prozent der Menschen in der betrachteten Bevölkerungsgruppe in Bezug auf ein bestimmtes Körpermaß den Perzentilwert unterschreiten. Für die praktische Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung wird eine Spannweite vom 5. bis zum 95. Perzentil des weiblichen bzw. männlichen Anteils der erwachsenen Bevölkerungsgruppe berücksichtigt. Bei sicherheitskritischen Maßen ist jedoch das erweiterte Intervall vom 1. bis zum 99. Perzentil zu verwenden.

Die Handhabung und Benutzung technischer Erzeugnisse führt zu bestimmten Körperhaltungen und -bewegungen. Diese resultieren aus der räumlichen Lage und Orientierung von Wirk- und Interaktionsflächen infolge der konstruktiven Gestaltung des technischen Erzeugnisses (z. B. Position und Bewegungsrichtung von Stellteilen) in Kombination mit den jeweiligen anthropometrischen Variablen (DIN 33402). Digitale Menschmodelle (sog. Manikins) ermöglichen als dreidimensionale modellhafte Abbilder des menschlichen Körpers (Mühlstedt et al. 2008) die Darstellung, Bewertung und Beurteilung dieser Zusammenhänge (siehe Abb. 13.76).

Maximale Körperkräfte können in Abhängigkeit von der Körperhaltung z. B. der DIN 33411 entnommen werden. Diese Norm ist jedoch nicht als Verfahren anzusehen. Sie ist lediglich eine Datensammlung, die wissenschaftlichen Gütekriterien genügt. Die in ihr enthaltenen Daten können aber bei der Anwendung von Verfahren wie z. B. der DIN EN 1005-3 (2009), berücksichtigt werden. Enthaltene Daten sind neben den maximalen statischen Aktionsmomenten an Handrädern sowie den maximalen statischen „Stellungskräften“ an

Stützflächen des Körpers in perzentilerter Form auch die maximalen statischen Aktionskräfte in Form von Isodynens, jeweils als Mittelwerte des Personenkollektivs. Während die beiden erstgenannten Größen direkt vom Konstrukteur angewendet werden können, sollten die Isodynenswerte nicht direkt im Konstruktionsprozess verwendet werden, da die Isodynens – Linien gleicher Kräfte im Bewegungsraum der Arme und Beine – lediglich Medianwerte (50. Perzentil) zur Orientierung darstellen. Die Isodynens liefern dem Konstrukteur jedoch wertvolle Hinweise an welchen Stellen im Manipulationsraum für eine vorgegebene Kraftrichtung Maxima bzw. Minima vorliegen, d. h. günstige oder ungünstige Orte für die Positionierung von Stellteilen bestehen. Die Dimensionierung anhand von Aktionskräften sollte sich an den unteren 5.-15. Perzentilen orientieren, um auch schwachen Personen ein Betätigen zu ermöglichen. Beim Festigkeitsnachweis für das Stellteil hingegen sollte sich der Konstrukteur an den oberen Perzentilwerten orientieren, damit auch starke Personen das Stellteil nicht zerstören können.

Um aus diesen Informationen im Einzelfall auf die zulässigen Kräfte schließen zu können, müssen verschiedene Variablen berücksichtigt werden. Dazu zählen die Häufigkeit, die Dauer der Benutzung, Alter, Geschlecht, Erfahrung und Übung der Arbeitsperson sowie die Kenntnis von Regeln und Methoden wie diese Einflüsse rechnerisch zu integrieren sind (Bullinger und Solf 1979, Handbuch der Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation 1980). Um eine gesundheitliche Gefährdung durch vorwiegend kraftbetonte Arbeit mit dem Erzeugnis auszuschließen, schreibt der Gesetzgeber die Gefährdungsanalyse vor, zu der unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden können (bspw. NIOSH 1981; Steinberg und Windberg 1997; Vedder und Laurig 1994).

### 13.8.1.2 Energetisch-effektorische Aspekte

Grundsätzlich ist Muskelarbeit bereits in Form der autonomen Leistung zur Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen erforderlich. Die bei der Handhabung und Benutzung eines technischen Erzeugnisses auftretenden Körperhaltungen und Körperbewegungen bedingen zusätzliche statische und dynamische Muskelarbeit mit je nach Bewegungsart unterschiedlichem Wirkungsgrad (DIN 33411). Diese Arten der Muskelarbeit erfordern eine der äußeren Belastung entsprechende zusätzliche Blutversorgung der arbeitenden Muskulatur durch das Herz-Kreislaufsystem. Bei statischer Muskelarbeit (z. B. beim Festhalten) ist die Durchblutung gedrosselt sowie die Entsorgung von Stoffwechselprodukten im Muskel verzögert. Daher können statisch nur knapp 15 % der Maximalkraft über einen längeren Zeitraum aufgebracht werden. Größere Kräfte können hingegen nur dynamisch und kurzzeitig sowie gefolgt von entsprechenden Erholzeiten (Rohmert 1960, 1962) erzeugt werden. Dabei unterscheidet man die schwere dynamische Arbeit, bei der mehrere große Muskelgruppen gleichzeitig zum Einsatz kommen, die einseitig dynamische Arbeit, wobei hauptsächlich kleinere bzw. lokal begrenzte Muskelgruppen im Einsatz sind, die bei hoher Belastung schnell ermüden und die allseitig dynamische Arbeit, bei der schwere dynamische Arbeit mit z. B. wechselnden Haltungskomponenten über längere Dauer (8 h Arbeitstag) gekoppelt wird. Etwa 25 % der maximal verfügbaren Muskelleistung ist bei normal trainierten Personen willentlich nicht zu mobilisieren (Mobilisationsschwelle), sondern steht nur bei

akuter Bedrohung der personellen Existenz („Todesangst“) zur Verfügung, es sei denn, die Mobilisationsschwelle wird durch pharmazeutische Manipulation aufgehoben („Doping“).

Eine weitere physiologische Bedingung menschlichen Lebens und Arbeitens ist eine etwa konstante Körperkerntemperatur zwischen 36 °C und 38 °C. Trotz äußerer Wärme- und Kälteeinwirkung sowie ständiger Wärmeerzeugung im Körperinneren (Grundumsatz je nach Arbeitsschwere ca. 70 W bis zu 500 W bei schwerer körperlicher Arbeit) ist mittels Wärmetransport auf dem Blutweg die Körperkerntemperatur im Gehirn und Körperinneren weitgehend konstant zu halten. Arbeitsanforderungen und klimatische Einflüsse sind dabei so zu gestalten, dass ein behagliches Klima erreicht wird. Die Behaglichkeit lässt sich z. B. durch ein Klimasummenmaß wie dem sog. vorausgesagten mittleren Votum Votum (PMV) (DIN EN ISO 7730 2006) beurteilen. Dieses berücksichtigt klimatische Einflüsse wie Temperatur, Luftbewegung, Wärmestrahlung sowie Expositionsdauer und gibt damit die Möglichkeit sowohl technische, z. B. Belüftung als auch organisatorische Maßnahmen, z. B. Pausen, aufeinander abzustimmen (DIN 33403).

Neben der Wärmestrahlung sind noch zahlreiche weitere Strahlungsarten für die ergonomische Analyse und Bewertung interessant. Hierzu gehören z. B. die Korpuskulärstrahlung oder die elektromagnetische Strahlung, die aufgrund der Störungen elektrophysiologischer Vorgänge oder der lokalen Wärmeentwicklung schädliche Wirkungen auf den Menschen haben können. Um nach aktuellem Wissensstand eine gesundheitliche Beeinträchtigung zu vermeiden, gibt das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchg) entsprechende Grenzwerte an.

### 13.8.1.3 Informatorische Aspekte

Neben der energetisch-effektorischen Gestaltung ist die Konzeption, Entwicklung und Verbesserung von technischen Erzeugnissen im Hinblick auf die menschliche Informationsverarbeitung eine wichtige Aufgabe des Konstrukteurs. Diese Systeme können sehr unterschiedliche Funktionen besitzen wie z. B. ein Cockpit zum Führen eines Verkehrsflugzeugs im Vergleich zu einer Leitwarte (DIN EN ISO 11064-3 2000) zur Führung und Überwachung einer hochautomatisierten Produktionsanlage. Beiden Fällen ist jedoch gemein, dass zur Erfüllung der Arbeitsaufgaben Information zielgerichtet verknüpft werden muss. Wichtige Zielgrößen sind die Wirksamkeit (das Flugzeug muss fliegen) und Effizienz (es sollte nicht zu viel Treibstoff verbraucht werden), ohne jedoch den Menschen zu unter- oder überfordern oder die Sicherheit zu gefährden. Alle menschlichen Aktivitäten sind mit Prozessen der Informationsverarbeitung verbunden, welche sich anhand des Paradigmas des Informationsumsatzes in die drei Phasen der Informationsaufnahme (sog. frühe Prozesse), Informationsverarbeitung (sog. zentrale Prozesse) sowie Informationsabgabe (sog. späte Prozesse) differenzieren lassen.

Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht beziehen sich die frühen Prozesse in erster Linie auf die Entdeckung von informationstragenden optischen und akustischen Signalen im Arbeitssystem und die Trennung dieser Signale gegenüber dem „Hintergrundrauschen“. Wesentliche ergonomische Kriterien beziehen sich daher auf die Wahrnehmung durch die Sinnesorgane. Da der Mensch je nach Umgebungssituation bis zu 90 % aller Informationen

aus seiner Umwelt visuell wahrnimmt, stellt eine gute Beleuchtung ein wesentliches Gestaltungskriterium dar. Wahrnehmungsfehler können durch eine geeignete Beleuchtung um 30–60 % reduziert und damit die Effektivität deutlich gesteigert werden. Wahrnehmungsphysiologische Größen beim Sehen sind beispielsweise minimale, optimale und maximale Leuchtdichten und Leuchtdichteunterschiede (Kontraste) von ausgedehnten, flächenhaften Anzeigen. Neben der Bildschirmarbeitsverordnung Anhang Nr. 15 „Beleuchtung“ und Nr. 16 „Blendung“ (BildscharbV 1996) geben auch die DIN 5035 Teil 7 (2004) und Teil 8 (2007) sowie die Normen (DIN 5035 2004, DIN 5040) Hinweise für eine der Aufgabe und dem Umfeld angepasste Beleuchtungsstärke. Bei der Gestaltung visueller Informationsquellen sind weiterhin die im nächsten Abschnitt genannten Gestaltgesetze zu berücksichtigen.

Zweitwichtigster Sinneskanal ist in den meisten technischen Systemen die auditive Wahrnehmung. Für die Stärke der Schallempfindung ist der Schalldruck und damit verbunden der Schalldruckpegel  $L_p$  maßgeblich, der sich aus dem effektiven Schalldruck  $p$  in Relation zur Hörschwelle  $p_0$  ermitteln lässt. Der Schalldruckpegel wird üblicherweise in der Pseudoeinheit decibel [dB] angegeben. Damit eine Lärmquelle angepasst an die spektrale Beanspruchung des menschlichen Ohres bewertet werden kann, erfolgt die Messung des bewerteten A-Schalldruckpegels in dB(A). Wie sich die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs über unterschiedliche Frequenzbereiche im Sinne eines subjektiven Vergleichs von Schallereignissen verändert, zeigen die sog. Kurven gleicher Lautstärke (Isophonen). Aktuelle Vorschriften wie bspw. die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261) (VDI 2057 2002-2006) oder auch die VDI 2058 (1988) nennen die jeweiligen Grenzwerte für A-bewertete Schalldruckpegel. Eine Gefährdungsbeurteilung umfasst dabei insbesondere Art, Ausmaß und Dauer der Exposition durch Lärm (DIN EN ISO 9612 2009), einen Abgleich mit den Auslösewerten nach § 6 Satz 1 und den Expositionswerten nach § 8 Abs. 2, die Substitutionsprüfung (sind alternative Lärmge minderte Arbeitsmittel verfügbar? (VDI-Richtlinie 3720 1982–1990, DIN EN ISO 11690 1997, VDI-Richtlinie 2081 2001–2005) oder auch die Verfügbarkeit und Wirksamkeit von Gehörschutzmitteln (DIN EN 458 2005). Hier ist zu beachten, dass derartige Werte primär an den Eigenschaften der auditiven Rezeptoren des Menschen orientiert sind und die Weiterverarbeitung dieser Signale keineswegs den vergleichsweise einfachen Modellen entspricht. So filtert z. B. der Mensch einen Reiz in Abhängigkeit von Erfahrung, Interesse usw.

Die zentralen Prozesse beinhalten das Erkennen und Identifizieren der Signalbedeutung und die darauf aufbauenden Entscheidungsprozesse zur Urteilsbildung und Konsequenzbewertung. Zur strukturierten Analyse des Informationsverarbeitungsprozesses lassen sich sequenzielle Modelle oder Ressourcenmodelle sowie die Kombination beider Beschreibungsansätze einsetzen. Dabei ist bspw. nach Miller darauf zu achten, dass Systeme in für den Menschen überschaubare Subsysteme aus nicht mehr als  $7 \pm 2$  Einheiten mental differenziert werden können (Miller 1956). Der Konstrukteur sollte daher die angezeigte Struktur neuer Produkte und Systeme in der Art wählen, dass nicht mehr als die Zustandsgrößen eben dieser 7 Subsysteme – sog. Psychologische Einheiten – parallel im Gedächtnis behalten werden müssen. Weiterhin können sich entsprechend den Ressourcenmodellen (Kahneman 1973; Wickens 1984) unterschiedliche parallel durchgeführte Tätigkeiten gegenseitig beeinflussen. Die Theorie der multiplen Ressourcen stellt den Zusammenhang

einer Mehrfachbelastung auf die mentale Leistung in unterschiedlichen Teilaufgaben dar. Dementsprechend treten bei Aufgaben, welche dieselben Ressourcen (bspw. kognitive Verarbeitungskapazitäten) nutzen, gegenseitige Beeinflussungen und damit eine deutliche Reduzierung der Leistungsfähigkeit ein. Beispiele hierfür sind das Lösen von Rechenaufgaben bei gleichzeitigem Formulieren von Texten. Diese Interferenzerscheinung kann bspw. bei Doppelaufgaben mit Hilfe der sog. Performance Operating Characteristic (POC, siehe z. B. Schlick et al. 2010) beschrieben werden. Bei der Auslegung neuer technischer Erzeugnisse ist daher eine Entkopplung der gleichzeitig beanspruchten Verarbeitungskapazitäten anzustreben.

Die späten Prozesse koordinieren das manipulative und kommunikative Handeln und beinhalten u. a. die Organisation und Regelung von Bewegungen. Bei der Auslegung von Stellteilen ist zu beachten, dass der Betätigungssinn dem erwarteten Funktionseffekt entspricht. So sollte beispielsweise ein Bewegen des Vorschubhebels einer Ständerbohrmaschine nach unten zu einer Werkzeugbewegung in derselben Richtung führen. Diese Bewegungs-Effekt-Stereotypien und Konventionen sind in der (DIN EN 60447 2004) festgelegt.

Die Gestaltung von technischen Erzeugnissen sollte zu einer geringen informatorischen Belastung führen, ohne Monotonieerscheinungen und Vigilanzeffekte (anhaltende Aufmerksamkeit) zu begünstigen. Somit können mentale Kapazitäten für andere unerwartete Aufgaben vorgehalten werden, die den Menschen als kreativ denkenden Problemlöser benötigen (bspw. die Behebung von Störfällen). Zu beachten ist, dass sich früher gelernte Handlungsabläufe und -muster gewohnheitsmäßig wieder einstellen. Nachfolgemodelle technischer Erzeugnisse sollten deshalb hinsichtlich der Handhabung/Benutzung keine unnötigen Änderungen aufweisen. Insbesondere sind Umkehrungen (entgegengesetzte Lage, Orientierung oder Bewegung) zu vermeiden. Unzulässig sind solche Umkehrungen dann, wenn die Folgen einer Fehlhandlung direkt oder indirekt ein nicht vertretbares Sicherheitsrisiko zur Folge haben. Eine zu weitgehende Festlegung menschlichen Verhaltens durch technische oder organisatorische Systeme (z. B. hochfrequent getaktete Prozesse) kann bei langzeitiger Einwirkung Einstellungen und Verhalten der Betroffenen in nachteiliger Weise prägen. Tätigkeiten sollten daher Handlungs- und Entscheidungsspielräume bieten.

### 13.8.2 Tätigkeiten des Menschen und ergonomische Bedingungen

Der Mensch kann aktiv oder passiv in ein technisches System eingebunden sein. Bei aktiver Beziehung ist er handlungskompetent und gewollt im technischen System tätig, d. h. er übernimmt bestimmte Funktionen wie Betätigen, Steuern, Regeln, Überwachen, Beladen, Entnehmen, Registrieren u. a. Dabei durchläuft er unter Berücksichtigung des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses vielfach zyklisch folgende allgemein wiederkehrende Schritte:

- Bereitschaft für Tätigkeit herstellen, z. B. vorbereiten, zum Arbeitsplatz gehen,
- Informationen aufnehmen, z. B. wahrnehmen, entdecken, sich orientieren,

- Informationen verarbeiten, z. B. assoziieren, erkennen, Schlussfolgern, Handlungsalternativen aufstellen, sich für eine Handlungsalternative entscheiden, Handlungsausführung planen,
- Tätigkeit ausführen, z. B. betätigen, fügen, auseinandernehmen, schreiben, zeichnen, sprechen, Zeichen geben,
- Ergebnis kontrollieren, z. B. Zustand beurteilen, Messwerte prüfen,
- Bereitschaft aufheben bzw. neue Tätigkeit anschließen, z. B. aufräumen, abschließen, weggehen oder neue Tätigkeit ausführen.

Bei der funktionalen, d. h. gewollten Mitwirkung des Menschen ist sein Einsatz nach den genannten allgemeinen wiederkehrenden Tätigkeiten zu planen und es sind dafür auch die ergonomischen Voraussetzungen zu schaffen (DIN EN ISO 10075-2 2000; VDI/VDE-Richtlinie 3850 2004). Dies beginnt im Konstruktionsprozess sehr früh – bereits beim Klären der Aufgabenstellung (DIN EN ISO 9241-210 9241) – und findet notwendigerweise seinen Niederschlag in der Funktionsstruktur. Beispielsweise lassen sich aus der Wahrnehmungspsychologie verschiedene visuell-ergonomische Gestaltgesetze ableiten, welche die Schnelligkeit und Zuverlässigkeit der Informationsvermittlung zwischen Mensch und technischem Erzeugnis bei Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungsaufgaben positiv beeinflussen. Das Gesetz der Nähe besagt beispielsweise, dass Elemente, die geringe räumliche oder farbliche Abstände zueinander besitzen, als zusammengehörig wahrgenommen werden. Das Gesetz der Ähnlichkeit stützt sich auf den Effekt, dass in der Form und Größe übereinstimmende Objekte eher als zusammengehörig wahrgenommen werden als Elemente mit großen Unterschieden. Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Gesetze für die ergonomische Gestaltung, wie das Gesetz der geschlossenen Form, der Gleichzeitigkeit, der Einfachheit oder der durchgängigen Linie.

### 13.8.2.1 Aktiver Beitrag des Menschen

Die Sinnfälligkeit und Zweckmäßigkeit menschlichen Wirkens in technischen Systemen ist unter den Gesichtspunkten der Wirksamkeit, Effizienz und Humanität (menschliche Würde und Angemessenheit der Aufgabe) abwägend zu betrachten. Mit dieser anfänglichen und grundlegenden Überlegung werden der Einsatz des Menschen und damit das Prinzip der Lösung entscheidend beeinflusst und festgelegt. Für solche Entscheidungen können die folgenden ergonomischen Gesichtspunkte, aus denen zugleich Bewertungskriterien ableitbar sind, hilfreich sein (VDI-Richtlinie 2242 1986); (siehe Tab. 13.12):

- Ist der menschliche Einsatz notwendig oder erwünscht?
- Kann der Mensch wirksam sein?
- Ist seine Mitwirkung einfach möglich?
- Wird er hinreichend genau und zuverlässig mitwirken können?
- Ist die Tätigkeit eindeutig und sinnfällig?
- Wird die Tätigkeit erlernbar sein?

**Tab. 13.12** Ergonomische Gesichtspunkte für die Anforderungsliste und für Bewertungskriterien (nach VDI 2242 1986)

	1. Aktiver menschlicher Beitrag zur Erfüllung der Aufgabe in einem Wirkssystem	2. Aktive oder passive Betroffenheit aus Rück- und Nebenwirkungen auf den Menschen
Notwendig, erwünscht	Erträgliche Beanspruchung	
Wirksam	Geringe Ermüdung	
Einfach	Geringe Belästigung	
Schnell	Keine Verletzungsgefahr, sicher	
Genau	Keine Gesundheitsschädigung, -beeinträchtigung	
Zuverlässig	Anregung, Abwechslung, Förderung der Aufmerksamkeit, keine Monotonie	
Fehlerfrei	Entfaltungsmöglichkeit	
Eindeutig, sinnfällig		
Erlernbar		

Nur bei positiver Beantwortung der vorgenannten Fragen kann die aktive Mitwirkung des Menschen in technischen Systemen befürwortet werden.

### 13.8.2.2 Einwirkungen auf den Menschen

Der Mensch, ob aktiv oder passiv an Prozessen beteiligt, erfährt Rückwirkungen und Nebenwirkungen von technischen Systemen. Die Wirkungen des Energie-, Stoff- und Informationsflusses sowie die wesentlichen Umgebungsbedingungen, wie Schwingungen (VDI Richtlinie 2057 2002–2006), Beleuchtung (DIN 5034, DIN 2004, DIN 5040), Klima (DIN 33403; DIN EN ISO 7730 2006), Strahlung (DIN 2005–2006), Lärm (DIN EN 14255 1988; Blatt 2, VDI-Richtlinie 3720 1982–1990), aber auch die Anwesenheit von Gefahrstoffen sind von großer Bedeutung für die Belastung und Beanspruchung des Menschen. Diese Wirkungen müssen rechtzeitig erkannt, bewertet und beurteilt werden, um ihnen bei der Wahl des Wirkprinzips und der anschließenden Gestaltung Rechnung tragen zu können. Dabei kann es hilfreich sein, die folgenden Fragestellungen bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Aus den Fragestellungen sind wiederum Bewertungskriterien ableitbar (Tab. 13.12):

- Besteht eine erträgliche Beanspruchung für den Menschen und ist die einsetzende Ermüdung ausgleichbar?
- Sind Monotonieeffekte sowie Vigilanzerscheinungen vermieden und Anregung, Abwechslung und eine Förderung der Aufmerksamkeit gegeben?
- Liegen keine oder nur geringe Belästigungen bzw. Störungen vor?
- Werden Verletzungsgefahren vermieden?
- Werden Schädigungen oder Beeinträchtigungen der Gesundheit vermieden?
- Lässt die Tätigkeit Entfaltungsmöglichkeiten sowie Handlungs- und Entscheidungsspielräume zu?

**Tab. 13.13** Leitlinie mit Merkmalen zum Erkennen von ergonomischen Anforderungen (nach VDI 2242 1986)

Merkmale	Beispiel
Funktion	Funktionsverteilung, Art der Funktion, Art der Tätigkeit
Wirkprinzip	Art und Intensität des physikalischen oder chemischen Effekts, Auswirkungen wie Schwingungen, Lärm, Strahlung, Temperatur, Stoffe
Gestaltung	
– Art	Art der Elemente, Aufbau, Betätigungsart
– Form	körperlängserechte Gesamtform und Formelemente, Gliederung durch Symmetrie und Proportionen, gute Form
– Lage	Anordnung, Zuordnung, Abstand, Wirk- und Blickrichtung
– Größe	Abmessungen, Greifweite, Kontaktfläche
– Zahl	Anzahl, Aufteilung
Energie	Stellkraft, Stellweg, Widerstand, Dämpfung, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit
Stoff	Material hinsichtlich Farbe und Oberfläche, Kontakt-eigenschaften wie griffig, hautfreundlich
Signal	Kennzeichnung, Beschriftung, Symbole
Sicherheit	Freisein von Gefährdung, Vermeiden von Gefahrenquellen und -stellen, Verhindern von gefahrbringenden Bewegungen, Schutzmaßnahmen

Sollten diese Fragen nicht befriedigend beantwortet werden können, ist eine andere Lösung zu wählen oder zumindest eine wesentliche Verbesserung des Zustands vorzunehmen.

### 13.8.3 Erkennen ergonomischer Anforderungen

Für den Konstrukteur ist es in der Regel nicht einfach, für die vorstehenden Fragen unmittelbar eine befriedigende Antwort zu geben. Wie in der VDI-Richtlinie 2242 (1986) dargelegt, kann er sich dem Problem von zwei Seiten nähern, um die wichtigsten Einflüsse und geeignete Maßnahmen zu erkennen.

#### 13.8.3.1 Objektbezogene Betrachtung

In vielen Fällen ist das ergonomisch zu gestaltende technische Erzeugnis bekannt und festgelegt, z. B. ein Stellteil, ein Fahrersitz, eine bestimmte persönliche Schutzausrüstung. Dann empfiehlt es sich, den späteren Benutzer entsprechend der DIN EN ISO 13407 frühzeitig mit in die Entwicklung einzubeziehen und die in der Richtlinie VDI 2242 Blatt 2 (1986) angegebene Suchliste „Objekte“ heranzuziehen. Durch die Nutzung der für das zutreffende Objekt angeführten Leitlinie (Tab. 13.13) können sich Anregungen geholt und die bestehenden Einzelfragen geprüft werden. Bereits die Durchsicht der unter dem jeweiligen Objekt angeführten Hinweise ist lehrreich und macht die bestehende Problematik deutlich.

**Tab. 13.14** Zusammenfassung weiterführender Literatur grundlegende Fragestellungen bei der ergonomischen Gestaltung

Fragestellung	Literatur
Allgemeine Arbeitsplatzgestaltung	(Kern und Schmauder 2005; Schlick et al. 2010; Schmidt 1981; Schmidtko 1993; DIN 4543-1 1994; DIN EN ISO 6385 2004; DIN EN ISO 9241; VDI-Richtlinie 2242 1986)
Arbeitsphysiologie	(Rohmert und Rutenfranz 1983; DIN EN ISO 10075-2 2000)
Beleuchtung	(Böcker 1981; DIN 5034; DIN 2004; DIN 5040; DIN 12464; DIN 12665)
Bildschirmarbeitsplatz	(Richenhagen et al. 2002; DIN 9241 (bspw. Teil 302, 303, 304, 306, 307))
Klima	(Schmidtko 1993; DIN 33403)
Körperferechte Bedienung und Handhabung	(Bullinger und Solf 1979; Jenner et al. 1978; Neudörfer 1981; DIN 33402; DIN 33408; DIN 33411; DIN 894-3; DIN 6385)
Schwingungen und Lärm	(Dietz und Gummersbach 2000; Kern und Schmauder 2005; VDI 3720)
Überwachung und Steuerung	(Johannsen 1993; Rohmert 1960; Rohmert 1962; Schlick et al. 2010; DIN 33404-3; DIN 33411; DIN 33414-4; DIN 43790; DIN 7731)

Konkrete Maßnahmen werden anschließend der angeführten Literatur entnommen bzw. aus den gewonnenen Einsichten entwickelt.

### 13.8.3.2 Wirkungsbezogene Betrachtung

Aufgrund von neuen Situationen besteht zunächst nicht die Möglichkeit, ein Objekt frei definieren zu können. Somit ist es nötig, einen anderen Weg zu verfolgen: Aus dem bestehenden und damit bekannten Energie-, Stoff- und Informationsfluss des technischen Systems werden die auftretenden Wirkungen erkannt und mit den ergonomischen Anforderungen verglichen. Ergeben sich Beeinträchtigungen, nicht erträgliche Beanspruchungen oder sogar sicherheitskritische, gesundheitlich bedenkliche Aspekte, so muss eine andere Lösung gefunden werden. Die auftretenden Wirkungen, z. B. mechanische Schwingungen, Wärme, Strahlung u. a., lassen sich aus den einzelnen Energiearten und ihren Erscheinungsformen erkennen. Ebenso wird der Stofffluss daraufhin geprüft, ob z. B. die vorgesehenen Stoffe brandfördernd, leicht entzündlich, giftig, krebserzeugend o. ä. sind. Auch hier bietet VDI-Richtlinie 2242 Blatt 2 (1986) eine Suchliste „Wirkungen“ an, die zu den einzelnen Erscheinungsformen Hinweise über die bestehende Problematik gibt, aber auch Literatur zu Lösungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit den einschlägigen Vorschriften aufzeigt.

Für folgende grundlegende Fragestellungen können die in Tab. 13.14 zusammengestellten Quellen genutzt werden.

## 13.9 Formgebungsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>)

### 1. Aufgabe und Zielsetzung

Technische Erzeugnisse sollen nicht nur die geforderte technische Funktion im Sinne einer reinen Zweckerfüllung gemäß einer Funktionsstruktur erfüllen, sondern sie sollen auch den Menschen im Sinne einer befriedigenden Ästhetik ansprechen, d. h., das Erzeugnis soll auch gefallen. In den letzten Jahren ist sowohl im Anspruch als auch in der Art der Betrachtung ein erheblicher Wandel eingetreten.

Die VDI-Richtlinie 2224 (VDI2224 1972) beschränkte sich in ihren Empfehlungen auf die Formgebung eines Produktes, indem von einer technischen Lösung ausgehend, die äußere Form bestimmten Regeln wie kompakt, übersichtlich, einfach, einheitlich, funktions-, werkstoff- und fertigungsgerecht folgen möge.

Eine neuere Auffassung geht über Vorstehendes hinaus und überlässt der technischen Funktion nicht mehr den Vorrang, aus der sich die Form entwickelt. Insbesondere in einem Produktbereich, in dem das technische Erzeugnis eine größere Zielgruppe (Käufergruppe) ansprechen soll und ein täglicher, unmittelbarer Gebrauch durch den Menschen gegeben ist, werden nicht nur ästhetische und Gebrauchsmerkmale in den Vordergrund gestellt, sondern auch solche des Empfindens, wie des Prestiges, der Modernität, oder eines sonstigen Ausdrucks von Lebensgefühl. Die Formgebung oder nun besser die Gestaltung des Industrieprodukts im weiteren Sinne (Industrial Design) wird so unter Wahrung der technischen Funktion primär durch Designer, Künstler und Psychologen festgelegt, indem menschliche Empfindungen und Vorstellungen die Formen, Farben und Graphik und damit das ganze Aussehen bestimmen. Dabei spielen bestimmte Ausdrucks- und Stilformen, wie beispielsweise ein Military-Look bei Radiogeräten, ein Astronauten-Look bei Lampen, ein Safari-Look von Fahrzeugen oder nostalgische Elemente bei Telefonen und andere mehr, eine Rolle. So richtet sich die Karosserie eines Automobils stark nach künstlerischen, empfindungsbestimmten Kriterien als allein nach geringem Luftwiderstand oder gar nur als Umhüllung einer Maschine zum Zwecke der Fortbewegung.

Selbstverständlich müssen immer die funktionellen Anforderungen, die Gesichtspunkte der Sicherheit, des Gebrauchs und der Wirtschaftlichkeit erfüllt werden, aber die Zielrichtung des Designers ist es, ein Erzeugnis zu schaffen, das den Menschen anspricht. Bei solcher Zielsetzung bewegt sich die industrielle Formgebung zwischen Technik und Kunst, sie muss ergonomische Gesichtspunkte in gleicher Weise berücksichtigen, wie die der Sicherheit oder des Gebrauchs, und überdies das Firmenimage hervorheben, mit dem die Individualität des technischen Erzeugnisses unterstrichen wird. Insofern ist es erklärlich, dass der Designer sich nicht allein und dann vielleicht erst nachträglich mit einer Verbesserung der Form beschäftigt, sondern von vornherein bei der Produktgestaltung von der Aufgabenstellung an mitwirkt, u. U. durch Vorstudien die Aufgabenstellung erst ermöglicht oder sogar bestimmt.

Die Folge ist dann ein Konstruieren von „außen nach innen“, in dem von primär gesetzten Anforderungen an die Form, die Gestalt oder das Aussehen, die technische Funktion

„dennoch“ im Innern der gestalteten Hülle erfüllt und untergebracht werden muss. Dies zwingt dann zu einer sich über einen längeren Zeitraum erstreckenden Zusammenarbeit zwischen Designer und Konstrukteur.

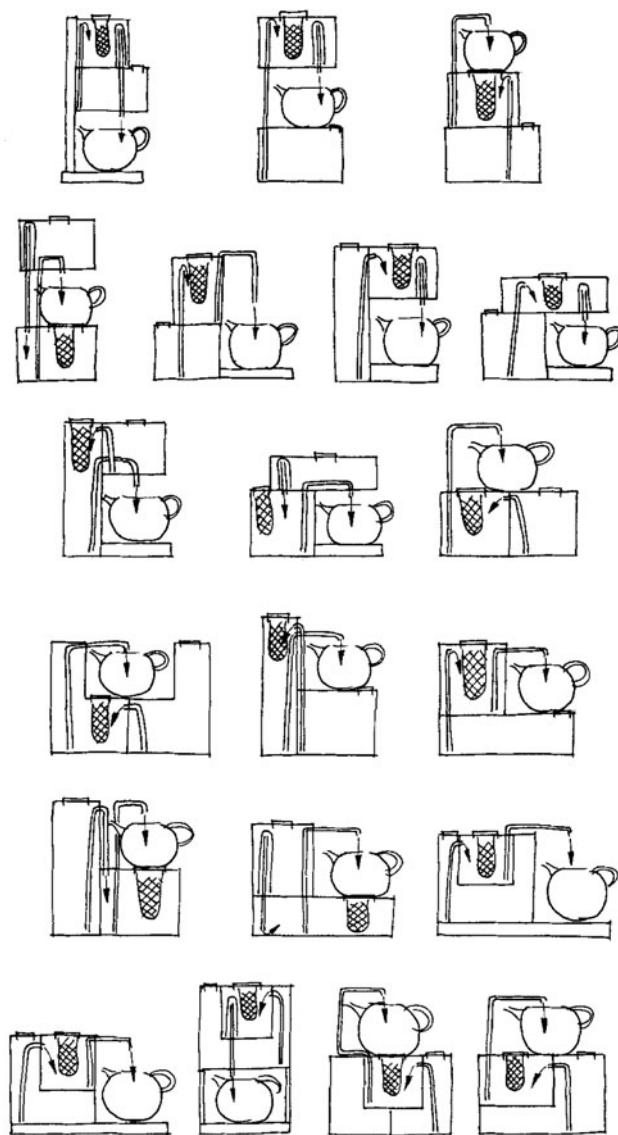
In dieser Zusammenarbeit sollte der Konstrukteur nicht versuchen, den Designer zu ersetzen, sondern vielmehr mithelfen, dass die entwickelten Vorstellungen technologisch und wirtschaftlich verwirklicht werden können. Hierbei werden genauso wie bei der Entwicklung technischer Lösungen Varianten entwickelt und bewertet sowie Modelle und Muster angefertigt, um auf diese Weise zu einer Entscheidung über das endgültige Aussehen des technischen Erzeugnisses zu kommen. Lösungssuchmethoden sind gleich oder ähnlich wie beim Konstruktionsprozess, z. B. Brainstorming, schrittweises Entwickeln von Gestaltvarianten in skizzenhafter Form, wobei auch ein systematisches Durcharbeiten der Anordnungs-, Form- und Farbvarianten auftritt.

Tjalve (1978) hat für solche Entwicklungen sehr anschauliche Beispiele gegeben (Abb. 13.77), wie überhaupt sein Vorgehen und die Art der Variation der Gestaltungen den in diesem Buch dargestellten Methoden entsprechen. Er weist darauf hin, dass

- Konstruktionsfaktoren (Zweck, Funktion, Baustruktur),
- Produktionsfaktoren (Herstell- und Montageverfahren, Wirtschaftlichkeit der Herstellung),
- Verkaufs- und Distributionsfaktoren (Verpackung, Transport, Lagerung, Firmenimage),
- Gebrauchsfaktoren (Handhabung, ergonomische Gesichtspunkte) und
- Destruktionsfaktoren (Recycling bzw. Beseitigung)

zusammenwirken und das Aussehen des Produkts bestimmen.

Auf die enge Verbindung zwischen gebrauchsgerechtem und ergonomieorientiertem Gestalten macht Seeger (1980) früh aufmerksam, während Klöcker (1981) stärker auf physiologische und psychologische Aspekte eingeht. In seinen letzten Veröffentlichungen setzt sich Seeger (1983, 1992) dann mit dem Basiswissen beim Entwickeln und Gestalten von Industrie-Produkten auseinander, indem er die Gestalt aus dem Aufbau (Anordnung), der Form, Farbe und der Grafik (Schriftzeichen, Bildzeichen) entwickelt. Von entscheidender Bedeutung sind dabei die von dem wahrnehmenden Menschen empfundenen Eindrücke. Erkenntnisse hierüber sind in den sich teilweise überdeckenden Gebieten der Physiologie, Psychologie und Ergonomie zu finden. Frick stellt in seinem Buch „Erzeugnisqualität und Design“ (Frick 1997) das systematische Zusammenwirken von Konstrukteuren und Designer im Zuge eines methodisch geleiteten, interdisziplinären Entwicklungsprozesses in den Vordergrund, um ein gutes Ergebnis erreichen zu können. Dazu gibt er anhand einer Reihe von Beispielen angepasste Methoden, Arbeitsmittel und Vorgehensweisen an, die einer solchen Zusammenarbeit dienlich sind.



**Abb. 13.77** Systematische Variation des Aufbaues (Struktur) von automatischen Teemaschinen nach Tjalve (1978), wobei die Zuordnung von Kochgefäß (Wassererhitzung), Teegefäß (Ziehen des Tees) und Teekanne untersucht wurde

## 2. Formgebungsgerechte Kennzeichen

Die technische Funktion mit der gewählten technischen Lösung und die aus ihr resultierende Baustruktur legen im Allgemeinen die äußere Gestalt durch Anordnung und Formen

der betreffenden Bauteile und Baugruppen fest. Dadurch entsteht die *Funktionsgestalt*, die vielfach nur wenig veränderbar ist, z. B. Schraubenschlüssel und Schrauben- bzw. Mutternkopf und Hebelarm, Schaufelbagger mit Schaufel, schaufelführendes und kraftausübendes Gestänge mit den zugehörigen Kraftkolben, Antriebsteil, Fahrwerk und Fahrerhaus. Der Mensch nimmt aber nicht nur diese Funktionsgestalt wahr, sondern empfindet weitere bestimmte Kennzeichen, z. B. ausladend, stabil, kompakt, auffällig, zeitgemäß u. a. Darüber hinaus erwartet er Kennzeichen zur Bedienung, für Tritt- und Aufenthaltsbereiche oder Warnungen vor Gefährdungen durch z. B. Stoßen, Quetschen usw. Alles zusammen bildet die *Kennzeichnungsgestalt*.

Bei der Formgestaltung muss die Funktionsgestalt und die notwendige oder wünschenswerte Kennzeichnungsgestalt in Einklang gebracht werden. In Anlehnung an Seeger (1980) werden folgende Kennzeichen und Regeln vorgestellt, die neben den funktionell bedingten und an anderen Stellen dieses Buches bereits behandelten noch wesentlich erscheinen:

*Markt- und benutzungsorientierte Kennzeichen* Wichtig ist die Zielgruppe, der entsprochen werden soll, z. B. der sachlich Orientierte (Fachmann), der Prestigeorientierte, der nostalgisch Ansprechbare, der Avantgardist u. Ä. Entsprechend werden die Kennzeichen des Produkts zu wählen sein. Grundsätzlich sollte aber für die Gesamtgestaltung gelten:

- einfach, einheitlich, rein, stilecht,
- geordnet, proportioniert, ähnlich,
- bezeichnenbar, ansprechbar, definierbar.

*Zweckorientierte Kennzeichen* Diese sollen den Zweck erkenn- und wahrnehmbar machen. Die äußere Form, Farbgebung und Graphik unterstützen die Erkennbarkeit der Funktion, die Stelle der Aktion und ihre Art, z. B. Werkzeugeinspannung, kraftausübendes Teil, Stelle der Bedienung.

*Bedienungsorientierte Kennzeichen* Richtige Bedienung und zweckmäßiger Gebrauch sollten durch Kennzeichen unterstützt werden:

- zentrale und erkennbare Bedienelemente sowie ihre funktionsmäßige sinnfällige Anordnung,
- ergonomisch richtige Gestaltung entsprechend dem Aktionsradius von Armen und Beinen bzw. Händen und Füßen,
- Kennzeichnung von Griff- und Trittfächern,
- Erkennbarkeit des Betriebszustands,
- Verwendung von Sicherheitskennzeichnung und Sicherheitsfarben nach DIN 4844 (DIN4844-1; DIN4844-2; DIN4844-3).

*Hersteller-, händler- oder markenorientierte Kennzeichen* Mit ihnen werden die Herkunft, der Firmenstil, die Hauslinie zum Ausdruck gebracht. Mit ihnen stellt sich eine Kontinuität, das Vertrauen zu bekannter Qualität, die Teilnahme an der Weiterentwicklung von Bewährtem, die Zugehörigkeit zu einer Gruppe ein. Erreicht wird diese Kennzeichnung durch erkennbare, gleichbleibende Gestaltungselemente, die typisch sind, obwohl sie sich in Stil und Ausdruck dem jeweiligen Zeitgeschmack anpassen können.

### 3. Richtlinien zur Formgebung

Die Kennzeichnungsgestalt wird erreicht durch einen bestimmten, gewollten *Ausdruck*, z. B. Leichtigkeit, Geschlossenheit, Stabilität, sowie durch eine entsprechende *Struktur* (Aufbau), *Form*, *Farbe* und *Grafik*, wobei nachstehende Empfehlungen (s. Abb. 13.78 bis Abb. 13.80) zu beachten sind:

#### *Wählen eines bestimmten Ausdrucks*

- Entsprechend der Zielsetzung einen erkennbaren, einheitlichen Ausdruck vermitteln, wie z. B. stabil, leicht, kompakt, der beim Betrachter einen entsprechenden Eindruck hervorruft.

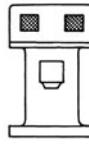
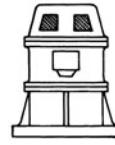
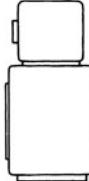
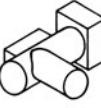
#### *Strukturieren der gesamten Form*

- In beziehbarer Weise anordnen, z. B. Kastenform, Blockform, Turmform oder L-Gestalt, C-Gestalt, O-Gestalt, T-Gestalt.
- Gliedern in klar abgrenzbare Bereiche mit gleichen, ähnlichen oder angepassten Formelementen.

#### *Vereinheitlichen der Form*

- Wenige Varianten der Form und Lage, z. B. nur runde Formen und horizontale Orientierung entsprechend der Längsachse oder nur rechteckige Formen und deren vertikale Orientierung.
- Mit der grundsätzlich gewählten Form entsprechende ähnliche Formelemente und angepasste Linienführung vorsehen. Dabei Teilstufen und Trennfugen von Bau- und Montagegruppen nutzen oder entsprechend erzwingen. Formordnung durch Zentrierung mehrerer Kanten auf einen Punkt oder gegliederte Parallelführung von Kanten ohne Unterbrechung herstellen. Mit Formelementen und Linienführung beabsichtigten Ausdruck unterstützen, z. B. betonen waagerechte Linien Gestrecktheit. Die Verträglichkeit mit der Silhouette ist zu beachten.

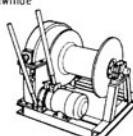
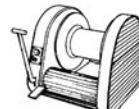
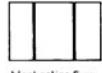
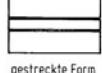
**Abb. 13.78** Gestaltungsrichtlinien zur Formgebung: Ausdruck und Struktur

Gestaltungsrichtlinien	nicht formgebungsgerecht	formgebungsgerecht
<b>Wählen eines bestimmten Ausdrucks</b>		
Vermitteln eines beabsichtigten, erkennbaren Ausdrucks	Drehstrommotor, vertikal :   instabil, kopflastig	 stabil, sicherstehend
<b>Strukturieren der gesamten Form</b>		
Anordnen in bezeichnbarer Weise	Vakuum - Pumpe   nicht bezeichnbar	 Kosten - Form
Gliedern in klar abgrenzbare Bereiche	Steuerungsgerät   Anhäufung, nicht bezeichnbar	 klar gegliedert, L-Form

### Unterstützen durch Farbe

- Farbordnung mit Formordnung abstimmen.
- Wenig Farbtöne und Materialunterschiede anstreben.
- Bei Mehrfarbigkeit eine Kennzeichnungsfarbe vorsehen und mit Komplementärfarben abstimmen. Bei weiteren Farben unfarbige (schwarze, weiße) Kontrastfarbe wählen. Zum Beispiel Schwarz Kontrastfarbe zu Gelb, Weiß Kontrastfarbe zu Rot, Grün und Blau oder ähnlich (vgl. auch Sicherheitsfarben).

**Abb. 13.79** Gestaltungsrichtlinien zur Formgebung:  
Vereinheitlichen der Formen

Gestaltungsrichtlinien	nicht formgebungsgerecht	formgebungsgerecht
<b>Vereinheitlichen der Formen</b>		
Verwenden von wenigen Formvarianten	 Generator	
	 Seilwinde offene Bauweise  geschlossene Bauweise	
Anstreben ähnlicher Formen und Konturen	 Lager	
Anpassen der Linienführung	 Klimagerät verwirrend, wenig homogen	 blockartige Form  gestreckte Form

### Ergänzen durch Grafik

- Stilgleiche Schrifttypen und grafische Zeichen verwenden.
- Einheitlichen Ausdruck durch gleiches Herstellverfahren der Grafik z. B. geätzte, gemalte oder erhabene Buchstaben anstreben.
- Grafik nach Größe, Form und Farbe mit übrigen Form- und Farbgebungen abstimmen.

**Abb. 13.80** Gestaltungsrichtlinien zur Formgebung: Farbe und Grafik

Gestaltungsrichtlinien	nicht formgebungsgerecht	formgebungsgerecht
<b>Unterstützen durch Farbe</b>		
Abstimmen von Farb- und Formgebung		 Funktionsfläche
Verringern von Farbtönen und Materialunterschieden		
Vorsehen einer Kennzeichnungsfarbe mit abgestimmten Komplementärfarben		
<b>Ergänzen durch Graphik</b>		
Verwenden von stilgleichen Schrifttypen und Zeichen		 konzentriert, einheitlich
Anstreben eines einheitlichen Ausdrucks		 alles erhabene Buchstaben
Abstimmen der Graphikelemente nach Art, Größe und Farbe mit übriger Formgestalt		

### 13.10 Fertigungsgerecht (Fritz Klocke)

Durch die Werkstückgestaltung übt der Konstrukteur einen großen Einfluss auf Fertigungskosten, -zeiten und -qualitäten aus. Er beeinflusst oder entscheidet sogar durch die gewählte Form, Abmessungen, Oberflächenqualität, Toleranzen und Fügepassungen die in Betracht kommenden Fertigungsverfahren und die hieraus resultierenden Prozessketten zur Herstellung des Produktes. Für eine optimale Anpassung der Produktgestalt an produktionstechnologische Fähigkeiten und Erfordernisse müssen schon frühzeitig die notwendigen Informationen über mögliche Fertigungstechnologien im Entwicklungsprozess vorliegen. In DIN 8580 sind die vielfältigen Fertigungstechnologien nach grundsätzlichen Ordnungskriterien klassifiziert. Die wesentlichen Ordnungsmerkmale sind: Zusammenhalt schaffen, Zusammenhalt beibehalten, Zusammenhalt auflösen. Daraus ergeben sich

sechs grundsätzliche Hauptgruppen: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften ändern, siehe DIN 8580 (2003).

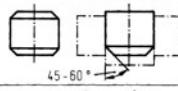
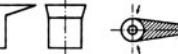
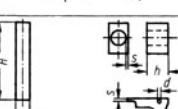
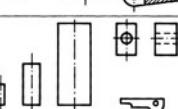
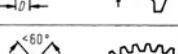
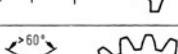
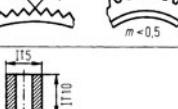
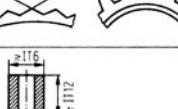
**Prozessketten** Die Herstellung von Produkten erfolgt durch das Zusammenspiel vieler einzelner Fertigungsprozessschritte. Ausgehend vom Rohteil erfolgt durch die Fertigungsverfahren eine schrittweise Änderung der Produkteigenschaften über endliche Zwischenzustände in einen definierten Endzustand (Fallböhmer 2000). Dabei erfährt das Bauteil durch Anwendung der einzelnen Fertigungsprozesse und durch deren Wechselwirkungen bestimmte Änderungen in seinen Eigenschaften. Die zeitabhängige Veränderung der Produkteigenschaften durch die einzelnen Fertigungsprozesse entlang der Prozesskette wird dabei auch als Fertigungshistorie bezeichnet (Willms 2008).

Die durch die Fertigungsprozesse bedingten Produkteigenschaften bestimmen wesentlich die Funktionalität des Bauteils. Die fertigungsbedingten Produkteigenschaften werden unterteilt in Geometrie- und Werkstoffeigenschaften. Die Gruppe der Geometrieeigenschaften setzt sich zusammen aus makrogeometrischen Eigenschaften, die immer im Zusammenhang mit den zulässigen Maß-, Form- und Lagetoleranzen zu sehen sind, sowie den mikrogeometrischen Eigenschaften, welche wesentlich die Oberflächenstruktur des Produktes charakterisieren. Die Oberflächenstruktur wird anhand von standardisierten Oberflächenkennwerten beschrieben, die in den meisten Anwendungen die für den Einsatzfall des Bauteils wichtigen Eigenschaften ausreichend beschreiben können. Die Werkstoffeigenschaften können durch einzelne Fertigungsverfahren entweder im kompletten Bauteil oder lokal in der Werkstückrandzone beeinflusst werden. Relevante, durch Fertigungsverfahren veränderte Werkstoffeigenschaften der Randzone sind Härteverläufe, Eigenspannungszustände und Werkstoffgefüge (Fallböhmer 2000; Wegner 2007).

Zur vollständigen Beschreibung der Fertigungshistorie müssen sämtliche Auswirkungen einzelner Technologien, sowohl gewollte als auch ungewollte, bekannt sein, da sie in der Prozesskette entweder als Eingangsinformationen für die Planung der Folgetechnologien genutzt werden oder auch eine Beeinflussung der Funktion des Produkts hervorrufen können. Oftmals entstehen durch die Kenntnis und die Anwendung alternativer Fertigungstechnologien sogar Lösungen, die zu einem Mehrwert des Produktes führen, z. B. durch zusätzliche Eigenschaften oder Funktionen des Produkts (Borsdorf 2007).

**Urformen** Urformen ist nach DIN 8580 das Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen eines Zusammenhalts. Der zur Verarbeitung kommende formlose Stoff kann fest, flüssig oder gasförmig sein, in den Übergangszuständen dampfförmig, breiig oder pastenförmig vorliegen, durch elektrolytisches Abscheiden entstehen oder aus pulvrigem oder körnigem Zustand geformt werden DIN 8580 (2003).

Die Pulvermetallurgie und das Gießen sind in der industriellen Fertigung besonders stark vertreten und werden im Folgenden im Besonderen berücksichtigt. Die geometrischen Einschränkungen und Freiheitsgrade sowie die erreichbaren Toleranzen ungeformter Bauteile unterscheiden sich fertigungsbedingt deutlich von zerspannten Bauteilen. Um die

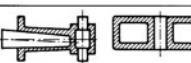
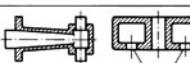
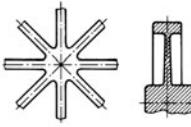
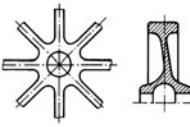
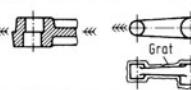
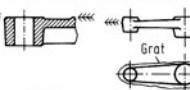
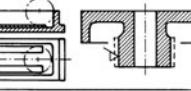
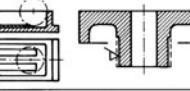
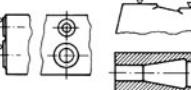
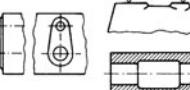
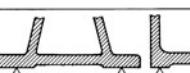
Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We	Vermeiden von Abrundungen und spitzen Winkeln am Werkzeug.	A Q		
Si	Vermeiden scharfer Kanten, spitzer Winkel und tangentialer Übergänge.	Q		
Si	Einhalten von Abmessungsgrenzen und -verhältnissen: Höhe $H$ /Breite $D < 2,5$ ; Wanddicken $s > 2$ mm; Bohrungen $d > 2$ mm.	Q		
Si	Vermeiden feinverzahnter Rändelungen und Profile.	Q		
Si	Vermeiden zu kleiner Toleranzen.	Q		

**Abb. 13.81** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Sinterteile. (In Anlehnung an FVPM 1971)

Kostenpotenziale ungeformter Bauteile realisieren zu können, muss der Konstrukteur die Möglichkeiten und Grenzen der Technologien kennen.

Bei pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen muss die Konstruktion den Pressvorgang berücksichtigen. Hinterschnitte sind aufgrund der Entformbarkeit zu vermeiden, jedoch können schrägverzahnte Bauteile durch Drehung der Stempel und Auswerfer dennoch gefertigt werden. Spitze Winkel reduzieren die Stabilität der Pressstempel, erhöhen damit das Risiko eines Stempelbruchs und sollten ebenfalls vermieden werden. Bei konischen Bauteilen ist ein Aufmaß in der Höhe als Puffer vorzusehen, da bei einer unvollständigen Pulverfüllung die Gefahr der Stempelkollision besteht. Große Höhe-zu-Breite-Verhältnisse beim Pressen erzeugen hohe Reibkräfte zwischen Matrize und Pulver, woraus ein hoher axialer Dichtegradient im Bauteil resultiert, der sich negativ auf die geometrische Genauigkeit und die Festigkeit auswirkt. Schmale Wanddicken sind nur schwer mit Pulver zu füllen und sollten deshalb vermieden werden. Die Toleranz der Bauteilhöhe ergibt sich aus der Exaktheit der eingefüllten Pulvermasse. Die Formtoleranzen der Außen- und Innenkontur werden von der Matrize und dem Pressdorn bestimmt. Die Lagetoleranz der Innenbohrung zur Außenkontur ist geringer, da der Pressdorn aufgrund von Spiel in der Stempelführung nicht exakt zur Matrize positioniert ist. Die für pulvermetallurgische Bauteile relevanten Gestaltungsrichtlinien sind in Abb. 13.81 zusammengefasst.

Bei Bauteilen aus Gusswerkstoffen muss die Gestaltung modellgerecht (Mo), formgerecht (Fo), gießgerecht (Gi) und bearbeitungsgerecht (Be) ausgeführt werden. In Abb. 13.82 sind die wichtigsten Gestaltungsrichtlinien zusammengestellt.

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Mo	Bevorzugen einfacher Formen für Modelle und Kerne (geradlinig, rechteckig).	A		
Mo	Anstreben ungeteilter Modelle, möglichst ohne Kerne (z.B. durch offene Querschn.).	A		
Fo	Vorsehen von Aushebeschrägen von der Teiltufe aus (DIN 1511).	Q		
Fo	Anordnen von Rippen so, dass Modell ausgehoben werden kann, Vermeiden von Hinterschneidungen.	Q		
Fo	Lagern der Kerne zuverlässig.	Q		
Gi	Vermeiden waagerechter Wandteile (Gasblasen, Lunker) und sich verengender Querschn. zu den Steigern.	Q		
Gi	Anstreben gleichmäßiger Wanddicken und Querschnitte sowie allmäßlicher Querschnittsübergänge, Beachten der Werkstoffeigenschaften für zul. Wanddicken und Stückgrößen.	Q		
Be	Anordnen der Teiltufen, dass Gussversatz nicht stört, in Bearbeitungszonen liegt oder leichte Gratentfernung möglich ist.	A Q		
Be	Vorsehen gießgerechter Bearbeitungszugaben mit Werkzeugauslauf.	A Q		
Be	Vorsehen ausreichender Spannflächen.	Q A		
Be	Vermeiden schrägliegender Bearbeitungsfächen und Bohrungsansätze.	A Q		
Be	Zusammenfassen von Bearbeitungsgängen durch Zusammenlegen und Angleichen von Bearbeitungsfächen und Bohrungen.	A		
Be	Bearbeiten nur unbedingt notwendiger Flächen durch Aufteilen großer Flächen.	A		

**Abb. 13.82** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen aus Gusswerkstoffen unter Berücksichtigung von Hänchen (1964); Matousek (1974); Niemann (2001); Rögnitz und Köhler (1959); ZGV-Lehrtafeln; ZGV-Mitteilungen

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We	Vermeiden von Unterschneidungen.	A		
We	Vorsehen von Aushebeschrägen (DIN 7523, Bl. 3)	A		
We	Anstreben von Teilstücken in etwa halber Höhe senkrecht zur kleinsten Höhe.	A		
We	Vermeiden geknickter Teilfugen (Gratnähte).	A Q		
We Sm	Anstreben einfacher, möglichst rotationssymmetrischer Teile, Vermeiden stark hervorspringender Teile.	A		
Sm	Anstreben von Formen, wie sie bei freier Stauchung entstehen, Anpassen an Fertigform bei großen Stückzahlen.	A Q		
Sm	Vermeiden zu dünner Böden.	Q		
Sm	Vorsehen großer Rundungen (DIN 7523), Vermeiden zu schlanker Rippen, von Hohlkehlen und zu kleinen Löchern.	Q		
Sm	Vermeiden schroffer Querschnittsübergänge und zu tief ins Gesenk ragender Querschnittsformen.	Q		
Sm	Versetzen von Teilstücken bei napfförmigen Teilen großer Tiefe.	Q		
Be	Anordnen der Teilstücke so, dass Versatz leicht erkennbar und Entfernen der Gratnaht leicht möglich ist.	A		
Be	Hervorheben von zu bearbeitenden Flächen	Q		

**Abb. 13.83** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Gesenkschmiedeteile unter Berücksichtigung von Bode (1984); Jung (1959); Rögnitz und Köhler (1959); VDI/ADB (1975); Zünkler (1962)

**Umformen** Die Verfahren der Umformtechnik werden gemäß (DIN 8582 2003) nach der im Bauteil vorherrschenden Belastungsart in Druckumformen, Zugdruckumformen, Zugumformen, Biegeumformen und Schubumformen unterteilt. Allgemeine Merkmale umformtechnisch hergestellter Bauteile sind die belastungsgünstige Gefügeausrichtung, die Funktionsintegration sowie die hohe Werkstoffausnutzung. Zur Gestaltung umformtechnisch herzustellender Bauteile sollen nachfolgend die Verfahrensgruppen Freiformen, Gesenkformen und Fließpressen (Druckumformen) sowie die Verfahrensgruppen Tiefziehen (Zugdruckumformen), Biegen mit geradliniger und Biegen mit drehender Werkzeugbewegung (Biegeumformen) betrachtet werden.

Beim Warmumformen/Halbwarmumformen liegt die Umformtemperatur deutlich über der Rekristallisationstemperatur. Für Stahlwerkstoffe ist dies der Temperaturbereich zwischen 600 und 1.300 °C. Die Verfahren der Warmumformung zeichnen sich durch hohe erreichbare Umformgrade aus, ohne dass es zu einer Werkstoffschädigung während des Umformprozesses kommt. Es kann allerdings zur Bildung von Zunderschichten mit entsprechendem Materialverlust und schlechter Oberflächengüte kommen.

Das Freiformen wird vorwiegend für große Schmiedebauteile bis 500 t in der Einzel- bis Kleinserienfertigung eingesetzt. Das Freiformen dient dabei entweder der Verbesserung der mechanischen Werkstoffeigenschaften oder der Rohteilherstellung (Klocke und König 2006). Der Umformvorgang beim Freiformen ist werkzeuggebunden. Da keine komplizierten Umformwerkzeuge verwendet werden, muss beim Freiformen die Bauteilgestaltung lediglich schmiedegerecht sein. Als Gestaltungsrichtlinien sind zu nennen:

- Anstreben einfacher Bauteilformen mit parallelen Flächen und großen Rundungen. Ziel: Verringerung des Aufwands und Verbesserung der Qualität.
- Anstreben eines geringen Bauteilgewichts, ggf. durch Teilen des Schmiedebauteils und anschließendes Fügen der einzelnen Bauteilkomponenten. Ziel: Verringerung des Aufwands.
- Große Verformungen vermeiden, wie beispielsweise während des Vorstauchens von Scheiben, um somit das Risiko der Entstehung von Rissen im Schmiedeteilkern zu minimieren. Ziel: Verbesserung der Qualität.
- Schmiedebauteile mit durchgehender Bohrung (z. B. Hohlzylinder) oder beidseitigen Absätzen vermeiden, da dadurch ein Umgreifen des Schmiedeteils erforderlich wird. Ziel: Verringerung des Aufwands.

Für das Gesenkformen, auch als Gesenkschmieden bezeichnet, sind in Abb. 13.83 wichtige Gestaltungsrichtlinien zusammengestellt (werkzeuggerechte (We), schmiedegerechte (Sm), bearbeitungsgerechte (Be)). Maßtoleranzen und weitere Gestaltungshinweise für Gesenk-schmiedeteile sind in DIN EN 10254 (2000); DIN EN 10243-1 (2000); DIN EN 10243-2 (2000) enthalten.

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We Fl	Vermeiden von Unterschneidungen.	Q A	 	 
Fl	Vermeiden von Seitenschrägen und kleinen Durchmesserunterschieden.	Q	 	 
Fl	Vorsehen rotationssymmetrischer Körper ohne Werkstoffanhäufungen, sonst teilen und fügen.	Q	  	  
Fl	Vermeiden schroffer Querschnittsänderungen, scharfer Kanten und Hohlkehlen.	Q	  	  
Fl	Vermeiden von kleinen, langen oder seitlichen Bohrungen sowie von Gewinden.	Q	  	  

**Abb. 13.84** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Kaltfließpressteile. (In Anlehnung an Feldmann 1959)

In Abhängigkeit von der Umformtemperatur wird zwischen Kalt- ( $20\text{--}650^{\circ}\text{C}$ ), Halbwarm- ( $650\text{--}900^{\circ}\text{C}$ ) und Warmumformung ( $900\text{--}1.300^{\circ}\text{C}$ ) unterschieden. Die wesentlichen Gestaltungsrichtlinien für das Kaltfließpressen einfacher rotationssymmetrischer Körper sind in Abb. 13.84, geordnet nach werkzeuggerecht (We) und fließgerecht (Fl), dargestellt. Mit den Verfahren des Kaltfließpressens können Grundtoleranzen von IT08 bis IT11 und arithmetische Mittenrauwerte von  $1\text{ }\mu\text{m}$  bis  $4\text{ }\mu\text{m}$  erzielt werden. Darüber hinaus zeichnet sich das Kaltfließpressen, wie alle Kaltumformverfahren, durch eine Festigkeitssteigerung des umgeformten Werkstoffs bei gleichzeitiger Reduktion der Werkstoffzähigkeit aus. Durch Kaltfließpressen zu verarbeitende Werkstoffe sollten nach Möglichkeit eine geringe Fließspannung, eine geringe Neigung zur Kaltverfestigung, ein homogenes Gefüge sowie ein hohes Umformvermögen aufweisen (Klocke und König 2006). Werkstoffbeispiele für das Kaltfließpressen sind Einsatz- (16MnCr5, 20MoCr4) und Vergütungsstähle (41Cr4, 42CrMo4) sowie gut umformbare Nichteisenmetalle (AlCuMg1, AlMg5) (Richtlinie VDI 3138-1 1998).

Die Verfahren des Tiefziehens und des Biegens gehören zur Gruppe der Blechumformverfahren. Kennzeichnend für diese Verfahren ist die im Vergleich zu anderen Umformverfahren geringe Formänderung des Werkstoffs. Aufgrund des daraus resultierenden hohen elastischen Anteils an der Gesamtformänderung sind elastische Rückfederungseffekte bei der Bauteil- und damit auch bei der Werkzeuggestaltung zu berücksichtigen.

Für das Gestalten von Versteifungssicken an tiefgezogenen Bauteilen sind die Gestaltungshinweise nach Oehler und Weber (1972) hilfreich. Weitere werkzeuggerechte Gestaltungshinweise für Tiefziehbauteile sind (Rögnitz und Köhler 1959):

- Abmessungen des tiefgezogenen Bauteils sind so zu wählen, dass die Anzahl der erforderlichen Ziehstufen minimal ist. Ziel: Verringerung des Aufwands.
- Erhöhung der Werkstück- und Werkzeugbeanspruchung beim Tiefziehen von Bauteilen mit rechteckigem Querschnitt. Daher sollten nach Möglichkeit ausschließlich Bauteile mit rotationssymmetrischem Querschnitt tiefgezogen werden. Ziele: Verringerung des Aufwands und Verbesserung der Qualität.

Anwendungsbeispiele für das Biegeumformen sind u. a. der Tank-, Behälter- und Apparatebau sowie Gehäuse, Türrahmenprofile, Luftführungen und Rohre. Die bei der Gestaltung von Biegebauteilen zu berücksichtigenden Richtlinien sind in Abb. 13.85 zusammengefasst (biegegerecht (Bi)).

**Trennen: Spanen, EDM, ECM und Laser** Von den in (DIN 8580 2003) aufgeführten Trennverfahren sollen im Folgenden nur das „Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden“ (Drehen, Bohren, Fräsen), das „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“ (Schleifen), das „Zerteilen“ (Schneiden) und das „Abtragen“ (EDM, ECM, Laser) betrachtet werden. Für alle Trennverfahren muss sich die Gestaltung an den Eigenheiten des Werkzeugs einschließlich des Spannens und des eigentlichen Trennvorgangs orientieren. Die Gestaltungsrichtlinien müssen deshalb *werkzeuggerecht* (We) und beim Zerspanen *spangerecht* (Sp) sein.

*Werkzeuggerecht bedeutet:*

- Vorsehen ausreichender Spannmöglichkeiten. Ziel: Qualität verbessern.
- Bevorzugen von Bearbeitungsoperationen, die ohne Umspannen des Werkstückes oder Neueinspannen von Werkzeugen auskommen. Ziel: Aufwand verringern, Qualität verbessern.
- Beachten des notwendigen Werkzeugauslaufs. Ziel: Qualität verbessern.

*Spangerecht bedeutet:*

- Vermeiden unnötiger Zerspanarbeit, d. h. Bearbeitungsflächen, Oberflächengüten und Toleranzen auf das unbedingt Notwendige beschränken (vorstehende Leisten und Augen in einer Bearbeitungshöhe günstig). Ziel: Aufwand verringern.
- Anstreben von Bearbeitungsflächen parallel oder senkrecht zur Aufspannfläche. Ziel: Aufwand verringern, Qualität verbessern.

In Abb. 13.86 sind spezielle Gestaltungsrichtlinien für Teile mit *Drehbearbeitung*, in Abb. 13.87 mit *Bohrbearbeitung*, in Abb. 13.88 mit *Fräsbearbeitung* und in Abb. 13.89 mit *Schleifbearbeitung* zusammengestellt. Auch bei der Gestaltung von *Schnitteilen* müssen die Eigenheiten des Werkzeugs (*werkzeuggerecht* (We)) und des Fertigungsvorgangs selbst (*schneidgerecht* (Sn)) beachtet werden, s. Abb. 13.90.

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Bi	Vermeiden komplexer Biegeteile (Materialverschnitt), dann besser teilen und fügen.	A		
Bi	Beachten von Mindestwerten für Biegeradien (Wulstbildung in der Stauchzone, Überdehnung in der Zugzone), Schenkelhöhe und Toleranzen.	Q		
Bi	Beachten eines Mindestabstandes von der Biegekante für vor dem Biegen eingebrachte Löcher.	Q		
Bi	Anstreben von Durchbrüchen und Ausklinkungen über die Biegekante, wenn Mindestabstand nicht möglich ist.	Q		
Bi	Vermeiden von schräg verlaufenden Außenkanten und Verjüngungen im Bereich der Biegekante.	Q		
Bi	Vorsehen von Freisparungen an Ecken mit allseitig umgebogenen Schenkeln.	Q		
Bi	Vorsehen von Falzstegen mit genügender Breite	Q		
Bi	Anstreben großer bleibender Öffnungen bei Hohlkörpern und hinterschnittenen Biegungen	Q A		
Bi	Vorsehen von Versteifungen an Blechrändern	A		
Bi	Anstreben gleicher Sickenformen	A		

**Abb. 13.85** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Biegeteile. (In Anlehnung an AEG 1971; Bode 1984)

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We	Beachten des erforderlichen Werkzeugauslaufs.	Q		
We	Anstreben einfacher Formmeißel.	A		
We	Vermeiden von Nuten und engen Toleranzen bei Innenbearbeitung.	A Q		
We	Vorsehen ausreichender Spannmöglichkeiten.	Q		
Sp	Vermeiden großer Zerspanarbeiten, z.B. durch hohe Wellenbunde, besser aufgesetzte Buchsen.	A		
Sp	Anpassen der Bearbeitungslängen und -güten an Funktion.	A		

**Abb. 13.86** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Teile mit Drehbearbeitung unter Berücksichtigung von Matousek (1974); Rögnitz und Köhler (1959)

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We Sp	Zulassen von Sacklöchern möglichst nur mit Bohrspitze.	A Q		
We Sp	Vorsehen von Ansatz- und Auslaufflächen bei Schräglöchern.	Q		
We	Anstreben durchgehender Bohrungen, Vermeiden von Sacklöchern.	A		

**Abb. 13.87** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Teile mit Bohrbearbeitung unter Berücksichtigung von Matousek (1974); Niemann (2001); Rögnitz und Köhler (1959)

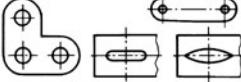
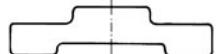
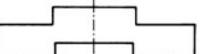
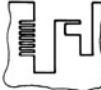
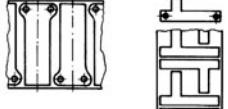
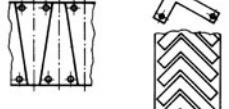
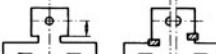
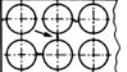
Die abtragenden Verfahren gliedern sich laut DIN 8590 (2003) in die drei Untergruppen: thermisches Abtragen (hier: Laser und Funkenerosion), chemisches Abtragen und elektrochemisches Abtragen. Während das thermische und elektrochemische Abtragen zur Formgebung eingesetzt werden können, wird das rein chemische Abtragen nur

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We	Anstreben gerader Fräsfächen, Formfräser teuer; Abmessungen so wählen, dass Satzfräser einsetzbar.	A		
We	Vorsehen auslaufender Nuten bei Scheibenfräsern; Scheibenfräsen billiger als Fingerfräsen.	A Q		
We	Anpassen des Werkzeugauslaufs an Fräserdurchmesser; Vermeiden von langen Fräserwegen durch Zulassen von gewölbten Bearbeitungsfächern (z. B. Schlitten).	A		
Sp	Anordnen von Flächen in gleicher Höhe und parallel zur Aufspannung.	A Q		

**Abb. 13.88** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Teile mit Fräsbearbeitung unter Berücksichtigung von Matousek (1974); Rögnitz und Köhler (1959)

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We	Vermeiden von Bundbegrenzungen.	Q A		
We	Vorsehen von Schleifscheibenauslauf.	Q		
We	Anstreben unbehinderten Schleifens durch zweckmäßige Anordnung der Bearbeitungsflächen.	A Q		
We Sp	Bevorzugen gleicher Ausrundungsradien (wenn kein Auslauf möglich) und Neigungen an einem Werkstück.	A Q		

**Abb. 13.89** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Teile mit Schleifbearbeitung unter Berücksichtigung von Rögnitz und Köhler (1959)

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
We	Anstreben einfacher Schnittformen; Bevorzugen abgeschrägter Ecken, Vermeiden von Rundungen.	A		
We	Anstreben gleicher Ausstanzungen	A		
We	Anstreben scharfkantiger Übergänge, um Aufteilung des Schneidstempels in einfache, gut schleifbare Querschnitte zu erleichtern.	A Q		
We	Vermeiden komplizierter Konturen	A Q		
We	Vermeiden zu dünner Stempelausführungen	A Q		
Sn	Vermeiden von Verschnitt (Abfall) durch Verschachteln zu Blechstreifen und Ausnutzen handelsüblicher Blechbreiten.	A		
Sn	Vermeiden spitzwinkriger Ausschnittsformen und zu enger Toleranzen.	Q		
Sn	Bevorzugen von Werkstückformen, die bei Folgeschnitten gegen Schnittversatz nicht anfällig sind.	Q		
Sn	Vermeiden von zu engen Lochabständen	Q		

**Abb. 13.90** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Schnittteile. (In Anlehnung an Bode 1984; Rögnitz und Köhler 1959)

zum Entgraten von Werkstücken eingesetzt und soll im Folgenden nicht näher betrachtet werden.

Die Bearbeitung mit Laserstrahl, z. B. zum Schneiden, Bohren oder Strukturieren von Oberflächen, gliedert sich nach (DIN 8590 2003) entsprechend des Wirkprinzips in das thermische Abtragen sowie das Brenn-, Schmelz- und Sublimierschneiden. Bei die-

sen Prozessen ist der Laserstrahl das Werkzeug. Zur Gestaltung von Schnittteilen und zu strukturierenden Oberflächen müssen sowohl die Eigenheiten des Werkzeugs „Laser“ (werkzeuggerecht – We) als auch des Fertigungsvorgangs (abtragsgerecht – AL) selbst berücksichtigt werden. Bezuglich einer werkzeuggerechten Gestaltung gilt es, eine gute Zugänglichkeit für den Laserstrahl vorzusehen. Dies minimiert den Aufwand bei der Prozessdurchführung, z. B. durch Vermeidung einer unnötig aufwändigen Strahlführung. Weiterhin sind Material und Oberflächenbeschaffenheit vorzugsweise so zu wählen (matt, keine polierten Flächen), dass sich eine möglichst gute Absorption der Laserstrahlung einstellt. Dies führt zu einem guten Wirkungsgrad und kann sowohl den Aufwand als auch die Qualität positiv beeinflussen. Bezuglich einer abtraggerechten Gestaltung gilt es, rechtwinklige Flanken beim Schneiden oder Strukturieren von Oberflächen zu vermeiden, da diese prozessbedingt nur mit sehr großem Aufwand realisiert werden können. Beim Laserstrahlschneiden sind zudem einige weitere Gestaltungsrichtlinien – vergleichbar denen beim „Schneiden (Zerteilen)“ – zu berücksichtigen. Ein Vermeiden von Verschnitt, zu dünner Schneidstege und komplizierten Konturen sind hier beispielsweise zu nennen.

Bei der funkenerosiven und elektrochemischen Bearbeitung ergeben sich aufgrund ähnlicher Aufbau- und Anordnungsprinzipien von Werkzeug- und Werkstück sowie Bearbeitungsmedium grundsätzlich ähnliche Anforderungen für eine werkzeuggerechte und abtraggerechte Gestaltung (Klocke und König 2007; VDI 3400-02). Generell kann gesagt werden, dass werkzeugseitig für die funkenerosive und elektrochemische Senkbearbeitung verschleißfeste, elektrisch leitfähige sowie gut bearbeitbare Elektrodenwerkstoffe (Kupfer, Graphit, Wolframkupfer usw.) entsprechend der spezifischen Bearbeitungstechnologie vorzusehen sind. Da es sich um indirekte Verfahren handelt, muss vor Prozessbeginn eine Negativgeometrie in die Werkzeugelektroden eingebracht werden. Die strukturierten Elektroden können anschließend in einer 3- bis 5-achsig geregelten Vorschubbewegung, die planetär überlagert sein kann, in das Werkstück eingesenkt werden. Zwischen Werkstück und Werkzeug bildet sich prozessbedingt der Arbeitsspalt aus, der durch das Arbeitsfluid gefüllt ist und das neben der wirkprinzipbedingten Funktion zur Kühlung und Spülung der Bearbeitungsstelle notwendig ist. Während bei der Funkenerosion hierdurch ein äquidistantes Untermaß der Elektroden berücksichtigt werden muss, ergeben sich für die elektrochemische Senkbearbeitung unterschiedliche Arbeitsspaltweiten in Abhängigkeit von den Elektrolysebedingungen entlang des Strömungsweges. Das Werkzeugelektroden-design wird daher in der Praxis meist iterativ in entsprechenden Vorversuchen angepasst. Gute Spülbedingungen sind in diesem Zusammenhang essenziell für stabile Prozessbedingungen und hohe Materialabtragraten. Aus diesem Grund sind insbesondere bei großen Aspektverhältnissen Elektrodendurchspülungen (Bohrbearbeitung) oder erzwungene Lateralspülungen bzw. Bewegungsspülungen durch Abheben der Werkzeugelektrode vorzusehen.

Bei der drahtfunkenerosiven Bearbeitung können aufgrund der werkzeugbedingten Kinematik nur Regelflächen (2,5-D) erzeugt werden, bei der ebenfalls der Arbeitsspalt zusätzlich zum Drahtelektrodenradius berücksichtigt werden muss. Durch die Verwendung angepasster Drahtelektrodendurchmesser ( $d = 0,02\text{--}0,33 \mu\text{m}$ ) können vergleichsweise

kleine Innenradien und Konturen realisiert werden. Eventuell entstehende Ausfallteile sind durch eine geeignete Bearbeitungsstrategie oder Werkstückanpassung möglichst zu vermeiden.

Charakteristisch für das funkenerosive Abtragen ist die verfahrensspezifische Oberflächenausbildung in Form von Kratern auf der Werkstückoberfläche. Diese ungerichtete, stochastische Struktur kann gezielt auch als Gestaltungselement genutzt werden. Durch Variation der Entladenenergie können sowohl rau als auch sehr glatte Oberflächen (Ra-Werte der Oberflächenrauheit zwischen 20 und 0,05 µm) gezielt hergestellt werden. Eine Vorgabe bzw. Bewertung (optische und haptische Aspekte) wird in der industriellen Praxis heute noch oft über ein VDI-Vergleichsnorma vorgenommen (VDI 3400 1974).

**Beschichten** Die Gestaltung von Teilen, die beschichtet werden sollen, hängt von den Forderungen und Eigenschaften des jeweiligen Beschichtungsprozesses ab:

- physikalische Gasphasenabscheidung (Physical Vapour Deposition, PVD): Verdampfen, Sputterdeposition, Ionenplattieren,
- chemische Gasphasenabscheidung (Chemical Vapour Deposition, CVD) und
- galvanische Verfahren.

**Physikalische Gasphasenabscheidung** Mit dem Begriff physikalische Gasphasenabscheidung wird eine Gruppe von Beschichtungsverfahren bezeichnet, bei denen die Schicht durch direkte Kondensation des Materialdampfes eines Ausgangsmaterials gebildet wird (Martin 2009; Mattox 2010). Durch PVD-Verfahren können beliebige Metalle und Legierungen sowie Kohlenstoff (z. B. als Diamond-Like-Carbon, DLC) abgeschieden werden. Auch die Abscheidung von keramischen Schichten in Form von Oxiden, Nitriden und Carbiden ist möglich.

Die PVD-Verfahren finden unter Hochvakuum statt, deswegen werden die Teile in Vakuumkammern im Batch-Betrieb (d. h. mehrere Bauteile gleichzeitig) beschichtet. Die Bauteilgröße und -geometrie müssen mit der bestehenden Anlagentechnik kompatibel sein. Die Substrattemperatur während der Beschichtung kann durch Heiz- oder Kühelemente genau eingestellt werden. Dadurch ist die Beschichtung von fast allen Festkörpern möglich. Die mögliche Schichtdicke liegt zwischen einzelnen Nanometern bis zu ein paar Mikrometern. Die Schichtdicke kann sehr genau kontrolliert werden, so dass PVD-Beschichtungen zur Erzielung von sehr engen Toleranzen in den Bauteildimensionen eingesetzt werden können. Der Sputterprozess ist ein Sichtlinienprozess. Das bedeutet, dass sich die Atome wegen des Hochvakuums von der Dampfquelle aus in geraden Linien bis zum Substrat bewegen. Um eine gleichmäßige Beschichtung der Teile zu erzielen, werden diese in der Beschichtungskammer vor der Dampfquelle bewegt. Die Beschichtung von Strukturen mit großen Aspektverhältnissen ist unabhängig von der Kinematik der Teile schwierig. Die Innstrukturen komplex geformter Teile können nicht gut beschichtet werden.

**Chemische Gasphasenabscheidung** Als chemische Gasphasenabscheidung wird eine Gruppe von Beschichtungsverfahren bezeichnet, bei denen die Schicht als die Feststoffkomponente einer chemischen Reaktion an der erhitzten Oberfläche eines Substrates aus der Gasphase abgeschieden wird (Martin 2009; Dobkin und Zuraw 2003). Der CVD-Prozess ist, anders als bei der physikalischen Gasphasenabscheidung, kein Sichtlinienprozess, sondern findet an der gesamten Bauteiloberfläche statt, was die gleichmäßige Beschichtung von Strukturen mit großen Aspektverhältnissen oder der Innenseite von Hohlkörpern ermöglicht. Es sind größere Schichtdicken als bei den PVD-Verfahren möglich. Voraussetzung für die Abscheidung einer Schicht ist, dass es eine gasförmige Verbindung gibt, aus der sie hergestellt werden kann. Daher ist die mögliche Schichtenvielfalt kleiner als bei der PVD. In der Regel finden die Reaktionen, die zur Schichtabscheidung führen, nur unter sehr hohen Temperaturen statt. Deswegen müssen Aspekte wie Werkstückverzug, Überschreitung der Erweichungstemperatur, Diffusionsprozesse usw. bei der Werkstoffwahl berücksichtigt werden.

**Galvanotechnik** Mit dem Begriff Galvanotechnik wird die elektrochemische oder chemische Abscheidung von metallischen Schichten bezeichnet (Kanani 2009). Als Substrat können alle metallischen Werkstoffe sowie viele Kunststoffe benutzt werden. Bei der Kunststoffbeschichtung muss vor dem Prozess durch andere Prozesse eine dünne leitfähige Schicht aufgebracht werden. Die Schichtdicken sind in der Regel größer als bei CVD- und PVD-Verfahren. Die elektrochemischen Verfahren basieren auf der Erzeugung eines elektrischen Feldes, in dem sich die Werkstoffe befinden. An scharfen Kanten ist die Feldstärke immer höher, was eine erhöhte Abscheidrate und somit eine ungleichmäßige Schichtdicke bedeutet. Deswegen sind abgerundete Konturen vorzuziehen. In den Innenseiten eines geschlossenen Werkstücks mit zu kleinen Öffnungen kann kein elektrisches Feld entstehen, was die Beschichtung dort verhindert. Das notwendige Eindringen und Auslaufen der Prozessflüssigkeiten kann bei Sacklöchern je nach Durchmesser und Tiefe erschwert oder verhindert werden, deswegen sind Durchgangslöcher vorzuziehen. Um große Weglängenunterschiede zwischen Anode und Kathode auszugleichen, wird die Anodengeometrie häufig äquidistant zur Kathodengeometrie ausgeführt, durch Modifikation des Elektrolyten kann die Streufähigkeit erhöht und somit ebenfalls ein Weglängenausgleich eingestellt werden.

---

## 13.11 Fügegerecht (Klaus Dilger)

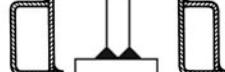
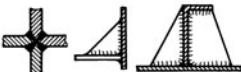
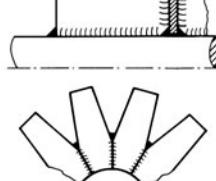
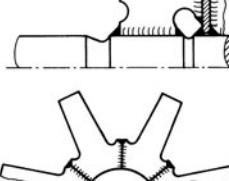
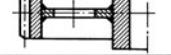
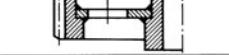
### 13.11.1 Schweißgerechte Gestaltung

Der Fertigungsvorgang des Schweißens wird in die drei Verfahrensschritte *Vorarbeiten* (Vo), *Schweißen* (Sw) und *Nacharbeiten* (Na) gegliedert. Folgende Gestaltungsregeln sollen beachtet werden:

- Vo, Sw, Na: Vermeiden einer bloßen Nachbildung von Gusskonstruktionen: Bevorzugen von genormten, handelsüblichen oder auch vorgefertigten Blechen, Profilen oder sonstigen Halbzeugen; Ausnutzen der Möglichkeiten einer Verbundbauweise (Guss-Schmiedestück). Ziel: Aufwand verringern.
- Vo, Sw: Vorarbeiten und Schweißarbeiten sollten so ausgeführt werden, dass Nacharbeit so weit wie möglich vermieden wird. Ziele: Qualität verbessern und Aufwand verringern.
- Sw: Anpassen der Werkstoff- und Schweißgüte sowie des Schweißverfahrens an die Erfordernisse hinsichtlich Festigkeit, Dichtheit und auch Formschönheit. Ziel: Qualität verbessern, Aufwand verringern.
- Sw: Anstreben kleiner Schweißnahtquerschnitte und Werkstückabmessungen, um die Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften gering zu halten und die Handhabung zu verbessern. Ziel: Qualität verbessern, Aufwand verringern.
- Sw, Na: Minimieren des Schweißvolumens (Wärmeeinbringung), um Verzug und Richtarbeit zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Ziel: Qualität verbessern, Aufwand verringern. Weitere Gestaltungsrichtlinien, s. Abb. 13.91.

### 13.11.2 Klebgerechte Gestaltung

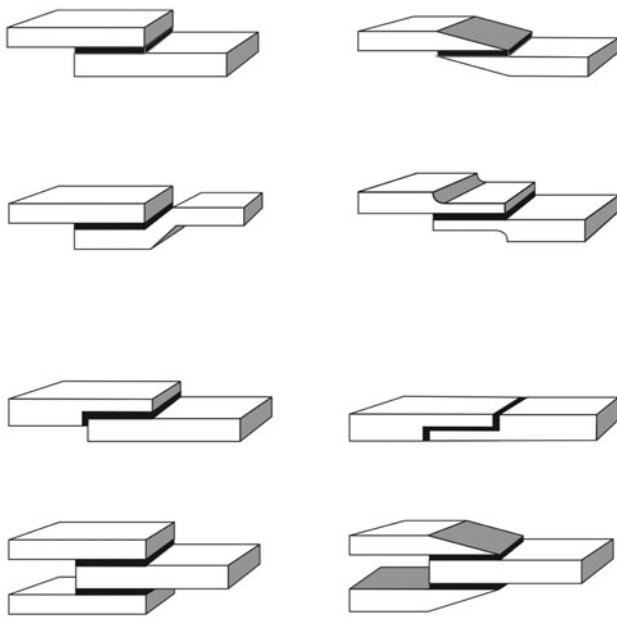
Kleben als Fügetechnik wird genutzt, um komplexe Teile aus Substrukturen zu fertigen. Die Verbindung muss bestimmten Eigenschaften genügen, die sich von der Anwendung des Bauteils ableiten lassen. In den meisten Fällen können die erforderlichen Eigenschaften auch von den eingesetzten Werkstoffen abgeleitet werden, da diese Werkstoffe gewählt wurden, um den zu erwartenden Einwirkungen zu widerstehen. Darüber hinaus können durch Klebungen Eigenschaften erzielt werden, die in einer monolithischen Bauweise nicht darstellbar sind. Dies sind z. B. elektrische Isolation oder die Dämpfung von Schwingungen, um die Schallemission zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund muss bei der Gestaltung klebgerechter Geometrien zwischen unterschiedlichen Stoffklassen und einer Vielzahl von Anwendungen und den hiermit verbundenen Beanspruchungen und Umgebungsbedingungen unterschieden werden. Umgebungseinflüsse, wie Feuchtigkeit, Extremtemperaturen, Thermowechsel, und Medien wie Öl oder Lösungsmittel usw. haben einen erheblichen Einfluss auf Festigkeit und Beständigkeit einer Klebverbindung und müssen bei der Klebstoffauswahl und der Gestaltung der Bauteile berücksichtigt werden. Neben dem Einsatz einer geeigneten Oberflächenvorbehandlung und einer Vergrößerung der Klebefläche kann es bei möglichem Medienzutritt auch sinnvoll sein, die Klebfuge gegenüber diesem Medienzutritt abzudichten. In jedem Fall sollte vor allem bei der Einwirkung von Feuchte /Wasser darauf geachtet werden, dass das Wasser abfließen kann und somit nicht dauerhaft auf die Klebschicht einwirkt. Eine Schwächung der Klebung kann in diesem Fall durch die Schwächung der Klebschicht selbst oder durch die Schwächung der Randschichten zwischen der Klebschicht und einem der Fügeteile ausgehen. Für eine klebgerechte Gestaltung müssen diese Randbedingungen berücksichtigt werden.

Verf.	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Vo	Bevorzugen von Lösungen mit wenigen Teilen und Schweißnähten.	A		
Vo Sw Na	Anstreben beanspruchungsgerechter Nahtformen, wenn es die Fertigung zulässt.	A		
Vo Sw	Vermeiden von Nahtanhäufungen und -kreuzungen.	A Q		
Sw	Reduzieren von Schrumpfspannungen (Eigenspannungen, Verzug) durch Nahtformlänge, -anordnung und Schweißfolge sowie durch elastische Anschlussquerschnitte mit niedrigen Steifigkeiten (elastische Zunge und Ecke).	Q		
Sw	Anstreben guter Zugänglichkeit der Nähte.	A Q		
Sw Na	Eindeutiges Positionieren zum Schweißen, z.B. durch Fixierung der Fügeteile.	Q		
Na	Vorsehen von Bearbeitungszugaben, um Schweißtoleranzen auszugleichen.	Q		

**Abb. 13.91** Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für geschweißte Teile unter Berücksichtigung von Bode (1984); Niemann (2001); Reihlen (1996); Veit und Scheermann (1972)

**Grundlagen** Die Gestaltung und die Auslegung geklebter Verbindungen sind in den letzten 50 Jahren in einer Vielzahl von Publikationen betrachtet und diskutiert worden. Aus diesem Grunde sollen in dieser Abhandlung nur grundsätzliche Zusammenhänge dargestellt und an wenigen Beispielen diskutiert werden. Weitere Informationen können der aufgeführten Literatur entnommen werden (Chamis und Murthy 1991; Baldan 2004; Apalak et al. 1995; Fuhrmann und Hinterwaldner 1984; Heitz 1971; Moulds 2006; Ulmer und Hennig 1962; Käufer 1984; Marques und Da Silva 2008). In den meisten Fällen sind sowohl Festigkeit als auch Steifigkeit einer Klebschicht erheblich geringer als Festigkeit und Steifigkeit der Fügeteile, die mit dieser Klebschicht verbunden werden sollen. Gebräuchliche Klebstoffe verfügen über eine Zugscherfestigkeit von 1 bis 40 MPa, abhängig von Klebfugengeometrie, Temperatur usw., und einen E-Modul von 1 bis 10.000 MPa. Verglichen mit unterschiedlichen Stahlgüten, die über einen Festigkeitsbereich von ca. 350 bis 2.000 MPa und einen

**Abb. 13.92** Klebegeometrien zur Vergrößerung der Klebefläche bei gleichzeitiger Reduktion von Spannungsspitzen

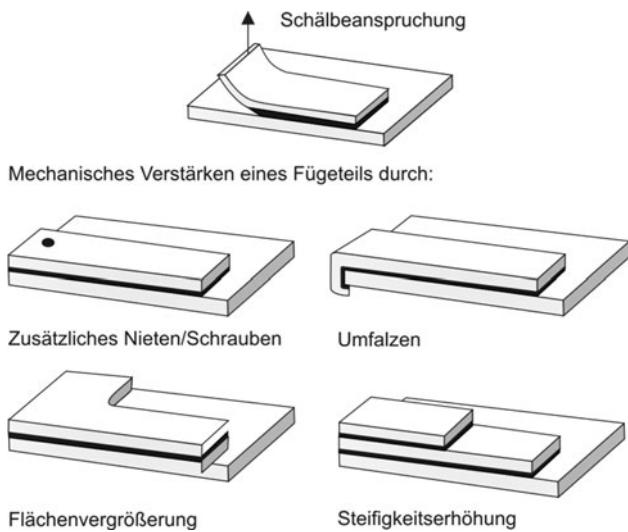


E-Modul von ca. 210.000 MPa verfügen, ergibt sich somit ein Faktor von ca. 10 bis 1.000 in Bezug auf die Festigkeit und 20 bis 200.000 in Bezug auf die Steifigkeit.

Um diese Unterschiede zu kompensieren, muss eine geeignete Geometrie für die Klebefuge gewählt werden. Wenn beispielsweise Stahlblech mit einem hochfesten Epoxidharzklebstoff geklebt werden soll, muss die Klebefläche ungefähr das Zehnfache des Blechquerschnitts betragen, um den Blechwerkstoff voll auszunutzen. Dieses Beispiel zeigt, dass die relativ geringere Festigkeit des Klebstoffs über eine größere Klebefläche ausgeglichen werden muss. Einige Möglichkeiten, die Klebefläche gegenüber dem Bauteilquerschnitt zu vergrößern, sind für Flachmaterialien in Abb. 13.92 dargestellt. Hierbei dienen die mehrschnittigen Überlappungen zusätzlich dazu, eine zentrische Krafteinleitung zu gewährleisten und somit schädliche Momente (und eine hieraus resultierende Schälung) zu verhindern. Die abgesetzten bzw. abgeschrägten Enden und Übergänge (Schäfte) führen zu einer gleichmäßigeren Krafteinleitung, was Spannungsspitzen reduziert und somit die Tragfähigkeit der Verbindung erhöht.

Grundsätzlich wird die Nennfestigkeit von Klebungen (Klebfestigkeit = maximal durch die Klebung übertragbare Kraft/Klebefläche) negativ beeinflusst, wenn Spannungskonzentrationen auftreten. Diese Spannungskonzentrationen können aus unterschiedlicher Fügeteildehnung (wie oben beschrieben) resultieren oder aber aus einer nicht flächigen Krafteinleitung, was zur Schäl- oder Spaltbelastung der Klebung führt. Da bei einer Schälbelastung nur ein sehr geringer Bereich der Klebschicht trägt, kommt es zur partiellen Überbeanspruchung, was dann zum fortschreitenden Versagen führt. Aus dem

**Abb. 13.93** Gestaltoptimierung zur Reduzierung von Schälspannungen (nach Habenicht 2006)

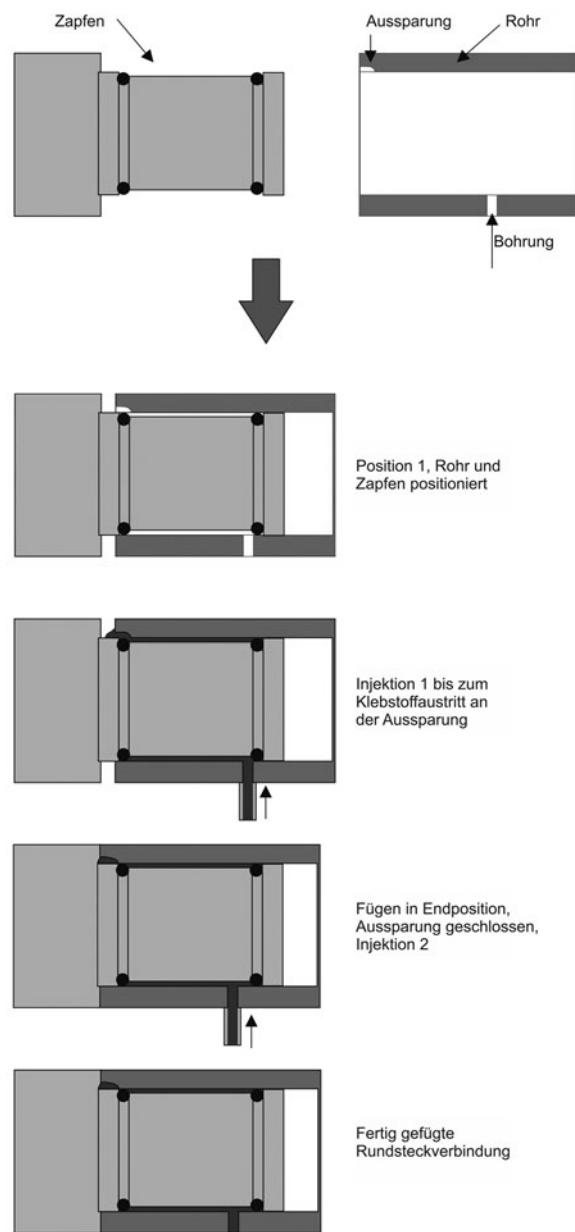


Beschriebenen ergibt sich die Notwendigkeit, auch Spannungskonzentrationen, die aus Schälspannungen resultieren, zu minimieren. Mögliche konstruktive Ausprägungen mit diesem Ziel sind in Abb. 13.93 dargestellt.

Für rotationssymmetrische Bauteile ergibt sich eine vergleichbare Situation. Auch in diesem Fall kann durch eine Überlappung die Klebefläche vergrößert werden. Hier kommt bei der Gestaltung und Herstellung der Klebungen erschwerend hinzu, dass die Verbindungsstellen statisch überbestimmt sind. Infolge von Bauteiltoleranzen können die Spaltbreiten zwischen null und einigen Millimetern schwanken. Hierbei führen zu geringe Spaltmaße zum Abschieben des Klebstoffs, was eine unzureichende Fugenfüllung und die Verschmutzung der Bauteile mit sich bringt. Zu große Spalte werden vom Klebstoff nicht ausgefüllt. Hinzu kommt, dass die große resultierende Klebschichtdicke infolge von Schrumpfung, Lufteinschlüssen usw. strukturell geschwächt wird, was geringere Klebfestigkeiten und weniger robuste Prozesse zur Folge hat. Klassischerweise werden entsprechende Bauteile mit einer Rotationsbewegung gefügt, um den Fügevorgang zu erleichtern und ein Abschieben zu minimieren. Zusätzlich wird häufig die Welle gekühlt und die Nabe erwärmt, um somit durch die thermische Ausdehnung den Spalt zu vergrößern. Dies kann auch genutzt werden, um in einer sog. Schrumpfklebung die Vorteile der Verfahren Schrumpfen und Kleben zu vereinigen. Hieraus resultieren Verbindungen mit sehr hohen Festigkeiten. Eine sinnvolle Alternative zur beschriebenen Vorgehensweise stellt das Injektionskleben dar, s. Abb. 13.94. Hier werden die Teile ohne Klebstoff gefügt. Der Klebstoff wird nach dem Fügen durch Bohrungen injiziert. Dichtungselemente oder in die Bauteile eingeprägte Strömungsleit- und Spaltabdichtungsbuckel gewährleisten die erforderliche Fugenfüllung. Die aufgeführte Verfahrensweise birgt erhebliches Potenzial, hat sich aber in der industriellen Umsetzung noch nicht durchgesetzt.

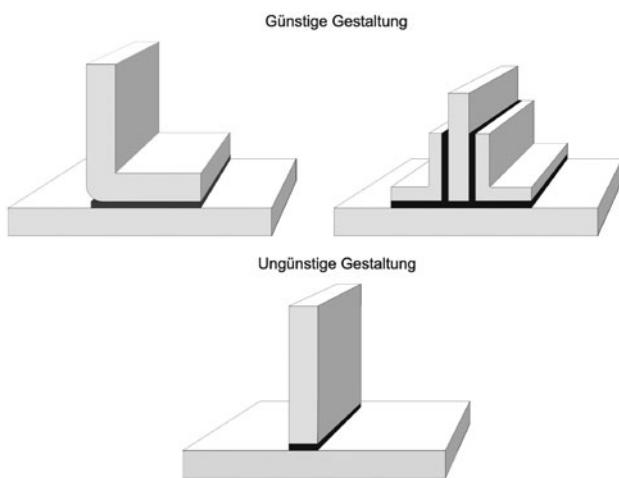
Eine dritte Stoßvariante, die bei der Gestaltung von Klebungen berücksichtigt werden muss, ist der T-Stoß. Hier werden zwei oder mehr Teile unter einem Winkel von meist

**Abb. 13.94** Injektionskleben geschlossener Profile (nach Siebert und Schlimmer 2005)



90° gefügt. Kritisch sind in diesem Fall neben der relativ geringen Fügefläche, die sich aus dem T-Stoß ergibt, das Auftreten von Schäl- und Spaltbeanspruchungen, die aus den angreifenden Momenten herrühren. Aus diesem Grund muss der Gestaltung dieser Stöße eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Gestaltungsvarianten sind Abb. 13.95

**Abb. 13.95** Gestaltungsbeispiele für T-Stöße



zu entnehmen. Weitere Gestaltungshinweise finden sich in der weiterführenden Literatur (Lees 1986; Hashim et al. 1990; Stuart und Crouch 1992; To et al. 2009; Davies und Khalil 1990).

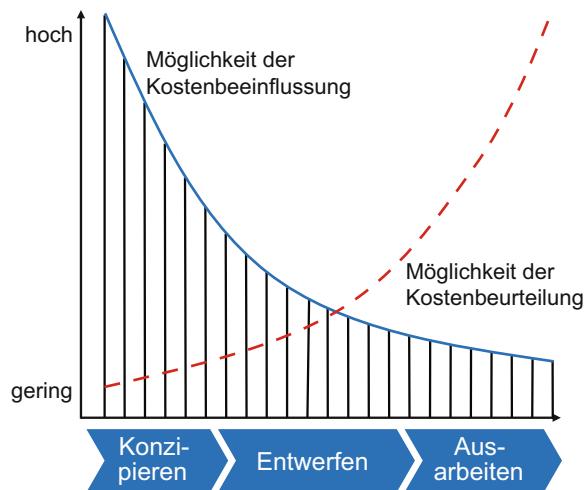
## 13.12 Montagegerecht (Rainer Müller)

### 13.12.1 Begriffsklärung und Einstieg in die Montageoperationen

Die Montage ist neben der Fertigung ein Teilsystem der Produktion innerhalb eines Unternehmens. Während des Montageprozesses wird aus der Summe von Einzelteilen, Baugruppen und Modulen das fertige Produkt zusammengebaut, in Betrieb genommen sowie dessen Funktion geprüft. Innerhalb der Montage durchläuft das Produkt einen großen Anteil der Wertschöpfung. Gleichzeitig gilt die Montage als Sammelbecken für sowohl technische als auch organisatorische Schwierigkeiten und Fehler, die nicht selten an anderer Stelle im Produktionsprozess zu verantworten sind. Die Beherrschung des Montageprozesses und des organisatorischen Umfelds entscheidet maßgeblich über die Wirtschaftlichkeit der Produktion.

Die Umfänge und der benötigte Aufwand innerhalb der Montage werden schon früh im Produktentstehungsprozess mit Rahmenbedingungen versehen. Die Konstruktion bestimmt nämlich nicht nur die Funktionalität und das Design des Produktes, sondern gibt zumindest indirekt auch den Rahmen für die Montagereihenfolge, die einzelnen Prozesse und den Anlagenaufbau vor. Die Einflüsse auf die Herstellkosten, die sich daraus ergeben, können im frühen Stadium des Konstruktionsprozesses nur mit erhöhtem Aufwand um-

**Abb. 13.96** Kostenbeeinflusung und -beurteilung im Konstruktionsprozess (VDI 1987)



fassend beurteilt werden (s. Abb. 13.96). Die entsprechenden finanziellen Auswirkungen entstehen erst bei und nach Anlauf der Montage.

Aus diesem Zusammenhang wird das Einsparpotenzial im Produktentstehungsprozess durch eine montagegerechte Konstruktion deutlich. Eine bereichsübergreifende und systematische Vorgehensweise von der Produktentwicklung, der Montage- und Materialflussplanung über die Betriebsmittelplanung bis hin zur Realisierung und Inbetriebnahme eines Montagesystems ist daher notwendig, um zu einem frühen Zeitpunkt in der Konstruktion eines Produktes Kostenverursacher zu identifizieren und konstruktiv zu vermindern (Konold und Reger 2003).

Die Zielsetzungen der Montagesystemgestaltung sind in Abb. 13.97 dargestellt. So wird das Ziel verfolgt, mit einem geringen Projektierungsaufwand für eine Anlage trotz minimaler Kosten eine maximale Ausbringung zu erreichen. Dabei müssen eine einwandfreie Produktqualität und gute Arbeitsbedingungen für die Mitarbeiter gewährleistet sein. Eine Optimierung des Montagesystems für diese Zielsetzungen muss auf Basis einer montagefreundlichen Produktgestaltung erfolgen.

### 13.12.2 Aufgaben innerhalb des Montageprozesses

Im Verlauf des Montageprozesses ergibt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben, die ein Montagesystem erfüllen muss. Die Auslegung der hierfür erforderlichen Einzelfunktionen und deren Abstimmung aufeinander sind die Kernaufgaben der Montageplanung. Das Verständnis der einzelnen Aufgaben und deren Bedeutung für das Montagesystem ist eine wesentliche Voraussetzung für eine montagegerechte Produktgestaltung. Daher sind die Basisprozesse der Montage, die insbesondere für mechatronische Produkte über reine Handhabungs- und Fügeoperationen hinausgehen, in Abb. 13.98 dargestellt und im Folgenden erläutert.



Abb. 13.97 Zielsetzungen für die Montagesystemgestaltung

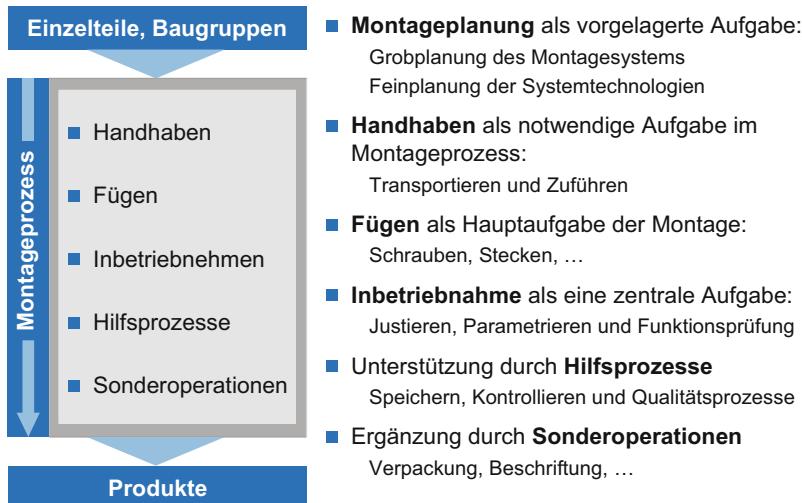
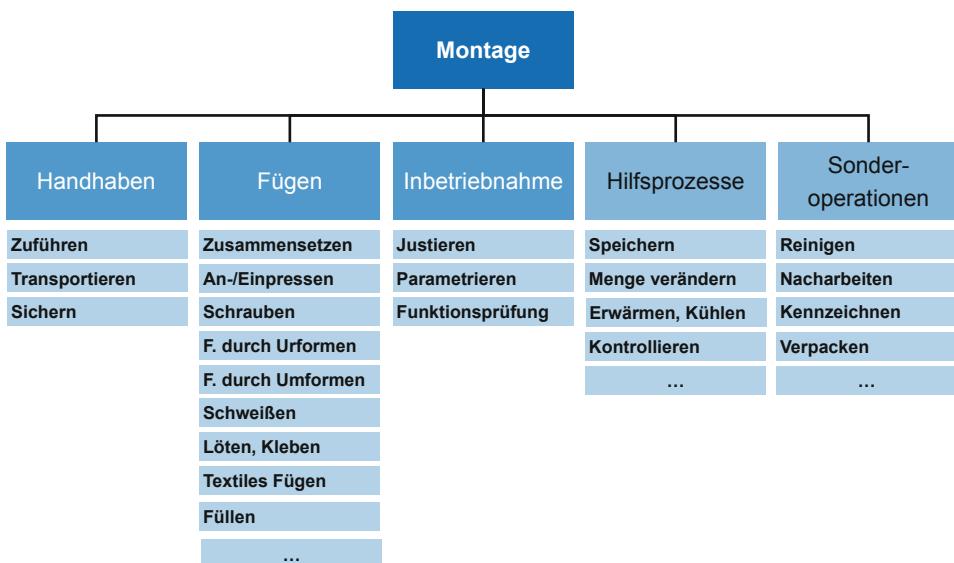


Abb. 13.98 Aufgaben im Montageprozess

Die zentrale Aufgabe der Montagesystemgestaltung besteht in der sinnvollen Auswahl, Zusammenstellung und Vernetzung einzelner Prozesse, basierend auf den Anforderungen des zu montierenden Produktes.

Die Montageoperationen treten bei jedem Montageprozess je nach Stückzahl oder Automatisierungsgrad in unterschiedlicher Ausprägung, Reihenfolge und Häufigkeit auf. In



**Abb. 13.99** Eingliederung der Montageprozesse (angelehnt an DIN 2003)

Abb. 13.99 sind die fünf Basisprozesse und deren Ausprägungen dargestellt. Diese werden innerhalb der folgenden Abschnitte erläutert.

**Handhaben** Zur Handhabung gehören die Aufgabenbereiche des Zuführens, Transportierens und Sicherns. Das Handhaben wird durch das Schaffen einer definierten räumlichen Lage der zu montierenden Objekte beschrieben.

Das Zuführen ist das Verbringen von Einzelteilen von der Bereitstellung am Montagesystem zum einzelnen Montageprozess. Hierbei ist der Ordnungszustand, d. h. die Festlegung von Position und Orientierung, eines Objekts durch die Anforderungen des betreffenden Prozesses vorgegeben. Der Ordnungszustand des Bauteils wird durch die Positionierung und Orientierung so verändert, dass es dem Fügeprozess zugeführt und prozesssicher verbaut werden kann.

Ein typisches Beispiel für einen Zuführprozess ist die automatische Zuführung von Schrauben über einen Vibrationswendelförderer. Abbildung 13.100 zeigt einen Vibrationswendelförderer, mit dessen Hilfe Schrauben positioniert und orientiert werden, damit sie anschließend dem Fügeprozess zugeführt werden können. Die Schrauben befinden sich im Fördertopf und werden durch mechanische Schwingungen in Bewegung versetzt. Mit Hilfe der innenliegenden Wendel werden die Schrauben aus dem Topf heraus befördert. Aufgrund der Wendelform und einer speziellen Vorrichtung zum Herstellen des Ordnungszustandes der Schrauben am oberen Ende des Topfes können nur korrekt angeordnete Schrauben aus dem Vibrationswendelförderer hinausgetragen und anschließend dem Fügeprozess zugeführt werden.

**Abb. 13.100** Schrauben-zuführung über Vibrations-wendelförderer (GRI 2010)

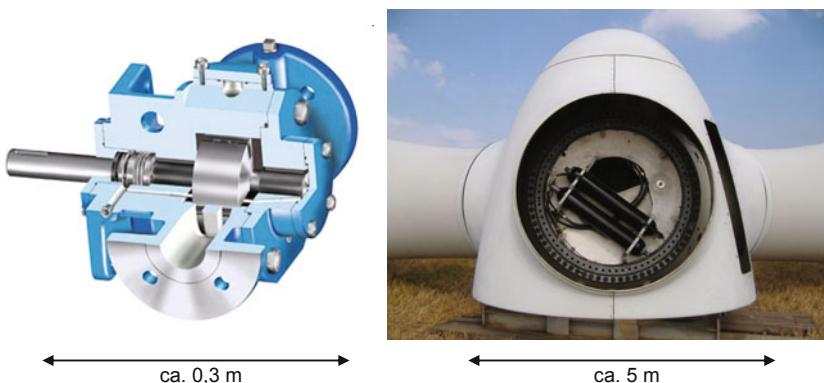


Das Transportieren der Bauteile geschieht zwischen den einzelnen Montagestationen. Meist wird das Produkt auf einem Werkstückträger transportiert, damit der Ordnungszustand des entstehenden Produktes für jede Montageoperation sichergestellt wird. Zusätzlich dient der Werkstückträger als Schnittstelle, so dass das Produkt mit Hilfe verschiedener Transportsysteme bewegt werden kann. Für den Transport werden flurgebundene, flurfreie oder aufgeständerte Transportsysteme in verschiedensten Größen und Ausführungen genutzt. Wesentliche Merkmale solcher Transportsysteme sind die Stetigkeit des Förderprozesses und die Flexibilität des Transportmittels.

Für einige Montageoperationen (z. B. Schrauben, Nieten, ...) ist es sinnvoll, das Produkt vor der Operation zu sichern oder zu spannen. Sichern bezeichnet im Kontext der Montagetechnik das vorübergehende Aufrechterhalten einer definierten räumlichen Anordnung. Sie kann durch Kraft-, Stoff- oder Formschluss oder eine Kombination dieser Prinzipien erreicht werden. Während der Begriff des Haltens allgemein das Sichern eines Körpers in einer bestimmten Position und Orientierung ohne Kraftschluss beschreibt, ist das sog. Spannen ein Haltevorgang unter Beteiligung eines Kraftschlusses.

**Fügen** Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Bauteilen geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt (DIN 2003).

Unter dem Begriff des Fügens werden Prozesse mit verschiedensten Ausprägungen hinsichtlich Vorgehensweise und erzielter Effekte zusammengefasst. So können die Füge-



**Abb. 13.101** Schraubverbindungen in verschiedenen Größen

partner direkt oder unter Verwendung von Hilfselementen verbunden werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die kinematische Umsetzung der Fügebewegung. Der Zusammenschnitt der gefügten Objekte kann form-, kraft- oder stoffschlüssig hergestellt werden, wovon nicht zuletzt die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Lösbarkeit der Verbindung abhängt.

Das Fügeverfahren bestimmt die Nutzbarkeit eines Produktes weit über den Herstellungsprozess hinaus. Die Sicherheit von Fügeverbindungen ist häufig ausschlaggebend für die Produktlebensdauer. Die Lösbarkeit der Fügeverbindung ermöglicht die Wartung und Reparatur von Produkten. Insbesondere für komplexe und langlebige Erzeugnisse muss selbst bei großer Variantenvielfalt eine wirtschaftlich durchführbare Wartung und Reparatur gewährleistet werden. Am Produktlebensende können lösbarer Verbindungen das stoffliche Trennen und Aufbereiten unterschiedlicher Werkstoffe für den Recyclingprozess vereinfachen (BMB 2004). Die Wirtschaftlichkeit der Fügeprozesse kann dabei durchaus variieren. So ist die Herstellung lösbarer Verbindungen in vielen Fällen beispielsweise aufgrund der Zuführung zusätzlicher Teile (z. B. Schrauben) aufwändiger als die Herstellung nicht lösbarer Verbindungen (z. B. Schweißen).

Als häufigster Vertreter der Fügeprozesse innerhalb heutiger Montageabläufe ist das Schrauben anzutreffen. Innerhalb der Fügeoperationen gehört das Schrauben zu der Gruppe „An- und Einpressen“ (s. Abb. 13.99) und zeichnet sich u. a. durch die Lösbarkeit der Verbindung und durch die Möglichkeit des Fügens unterschiedlicher Werkstoffe aus.

Abbildung 13.101 zeigt beispielhaft Schraubverbindungen in der Montage eines Pumpengehäuses und für die Flügelmontage eines Windrades. Für unterschiedlichste Produkte werden Schraubverbindungen anhand der notwendigen Anpresskräfte ausgelegt und so die Art und Anzahl der Schrauben sowie ein geeignetes Anzugsverfahren bestimmt.

Ein Fügeprozess, dessen Bedeutung über die letzten Jahre kontinuierlich zugenommen hat, ist der Klebeprozess. Fügen durch Kleben findet unter Verwendung eines nichtmetallischen Werkstoffes statt, der die Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit

verbindet. Eine Schädigung der Fügepartner beim Trennen der Verbindung hängt hier von der Art des verwendeten Klebstoffs ab.

Eine Systematisierung der Fügeverfahren ist in (DIN 2003) enthalten. Das flexible Fügen sowohl von verschleißenden als auch von langlebigen Baugruppen aus funktionsbedingt teilweise sehr unterschiedlichen Werkstoffen mit hoher Prozesssicherheit bei gleichzeitiger problemloser Trennbarkeit am Ende eines Produktlebenszyklus ist eine noch zu lösende Aufgabe der Produktionsforschung. Ziel ist die Entwicklung und Erprobung neuer fügetechnischer Verfahren und Ausrüstungen unter konsequenter Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus (BMB 2004).

Neue Forschungsergebnisse im Bereich der Fügetechnik können neuartige Montageprozesse erst ermöglichen bzw. bestehende Montageprozesse stark vereinfachen. Dadurch besteht ein stetiger Wandel für die montagegerechte Produktgestaltung, ausgelöst durch die Weiterentwicklung von Montageprozessen.

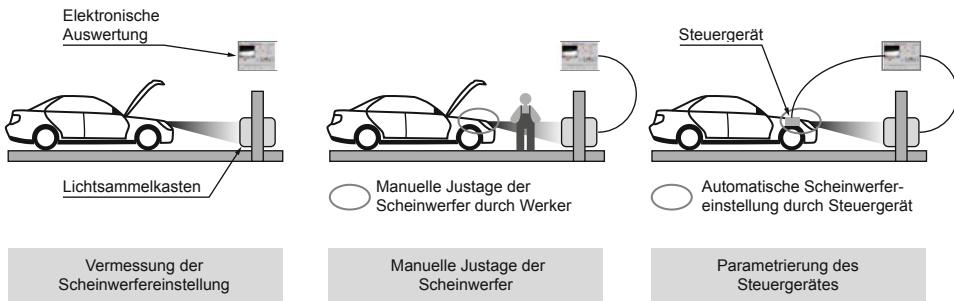
**Inbetriebnahme** Die Inbetriebnahme umfasst alle Tätigkeiten, die das zusammengebaute Modul oder Produkt entsprechend den Vorgaben in einen betriebsfähigen Zustand versetzen. Für moderne mechatronische Produktstrukturen ist das Zusammenspiel von Mechanik, Elektronik, Software und deren Schnittstellen zu gewährleisten. Inbetriebnahmeprozesse lassen sich in die Justage, die Parametrierung und die Funktionsprüfung klassifizieren.

Innerhalb der Justage wird ein Ausgleich von Teiletoleranzen durchgeführt und Einstellungen zur Gewährleistung der Funktion des Produktes vorgenommen. Man unterscheidet zwischen der passiven und aktiven Justage. Die passive Justage wird beispielsweise mit Hilfe einer Schablone oder einer vorab eingemessenen Vorrichtung durchgeführt, während sich die aktive Justage aus einer Messung und der darauf basierenden Einstellung des Produktmerkmals zusammensetzt.

Das Parametrieren ist die elektronische Inbetriebnahme des Produktes. Dabei werden Konfigurationswerte zur Definition des Betriebsverhalten an eine elektronische Steuerung übergeben und eingespeichert.

In Abb. 13.102 wird der Unterschied zwischen Justage und Parametrierung anhand der Scheinwerfereinstellung in der Automobil-Endmontage dargestellt. Im ersten Schaubild ist die Vermessung der aktuellen Scheinwerfereinstellung mit Hilfe eines Lichtsammelkastens abgebildet. Im mittleren Schaubild wird die manuelle Justage beschrieben, bei der der Werker den Scheinwerfer durch das Einstellen von Justageschrauben ausrichtet. Dieser Justageprozess kann in der Automobilproduktion auch teilweise oder vollständig automatisiert werden.

Darüber hinaus kann der Justageprozess durch einen Parametrierungsprozess ersetzt werden. Die im Produkt integrierte Aktorik kann so zur Vereinfachung des Inbetriebnahmeprozesses genutzt werden. Als Beispiel kann hier der Einsatz der vorhandenen Stellmotoren zur Scheinwerfereinstellung dienen. Während der Parametrierung werden aus der Lage des Fahrzeuges sowie der relativ dazu gemessenen Fehlstellung der Scheinwerfer Korrektur- bzw. Offsetwerte berechnet, die zur Nulllagenkorrektur in den Steuergeräten



**Abb. 13.102** Scheinwerferereinstellung in der Automobil-Endmontage

als Parameterwert hinterlegt werden. Die Scheinwerfer richten sich mit Hilfe dieses Offsets sowie der vorhandenen Elektromotoren (Leuchtweitenregelung, Kurvenlicht) bei der Fahrt dementsprechend aus.

Die Funktionsprüfung im Rahmen der Inbetriebnahme ist eine Prüfung des fertig- oder teilmontierten Produkts. Sie stellt die Erfüllung der grundlegenden, in der Produktspezifikation vorgegebenen Funktionen sicher. Sie ist immer dann vorzusehen, wenn die bloße Anwesenheit aller Einzelteile nach dem Zusammenbau, der Justage und der Parametrierung nicht für die Funktionserfüllung ausreichend ist.

Bei komplexen Produkten mit einer hohen Funktionsvielfalt ist eine komplett Überprüfung aller Einzelfunktionen oftmals unwirtschaftlich. Daher ist es sinnvoll, Module so zu konstruieren, dass sie bereits als selbstständige Einheit geprüft werden können, ohne dass sie im komplexen Gesamtprodukt eingebaut sind.

Das gesamte Feld der Inbetriebnahme nimmt mit steigender Komplexität und Variantenvielfalt der Produkte eine immer wichtigere Rolle innerhalb der Montage ein. Es werden aufwändige Prozesse benötigt, um die Funktionalität des Produktes einzustellen und zu überprüfen. Die Prozesssicherheit und die Produktivität solcher Montageabläufe kann in vielen Fällen durch eine Automatisierung der Prozesse gesteigert werden. Allerdings werden auch die Möglichkeiten der Prozessautomatisierung durch die Produktgestaltung beeinflusst.

**Hilfsprozesse und Sonderoperationen** Hilfsprozesse und Sonderoperationen haben flankierende Funktionen innerhalb der Montage. Hilfsprozesse leisten keinen direkten Beitrag zum Montagefortschritt und erzeugen keine Wertsteigerung des Produktes. Sie sind aber zur Erfüllung der Primäraufgaben der Montage notwendig.

Zu den Hilfsprozessen zählen u. a. das Speichern, das Verändern von Mengen, das Erwärmern, das Kühlern und das Kontrollieren:

- Speichern ist z. B. das Bevorraten geometrisch bestimmter Körper,
- Mengen lassen sich durch die Elementarfunktionen „Teilen“ oder „Vereinigen“ von Teilmengen verändern,

- Erwärmen und Kühlen unterstützt einige Füge- und Inbetriebnahmeprozesse. Beispielsweise wird beim Fügen einer Presspassung die Ausdehnung der Fügepartner bei unterschiedlichen Temperaturen ausgenutzt und
- Kontrollieren dient der qualitativen oder quantitativen Ermittlung von Abweichungen. Es wird beispielsweise die Anwesenheit, Anzahl, Identität (anhand von Form, Größe, usw.), Orientierung und Position von Bauteilen innerhalb der Handhabung kontrolliert (VDI Richtlinie 2860 2010a).

Da die Hilfsprozesse keinen Mehrwert und keinen Montagefortschritt für das Produkt erzeugen, sollte ihr Einsatz auf das notwendige Minimum reduziert werden. Allerdings sind zur Qualitäts- und Prozesssicherung beispielsweise Anwesenheitsprüfungen bei komplexen Fügeoperationen zwingend notwendig, um die Prozesssicherheit zu gewährleisten.

Sonderoperationen wirken sich im Gegensatz zu den Hilfsprozessen wertsteigernd auf das Produkt aus, ohne jedoch den Grundfunktionen der Handhabung, des Fügens und der Inbetriebnahme zugeordnet zu sein.

Zu den Sonderoperationen gehören z. B.

- das Reinigen des Endproduktes,
- das Kennzeichnen,
- das Verpacken und die Transportsicherung,

und ggf. die Nacharbeit, falls Montageprozesse nicht fehlerfrei durchgeführt wurden und zur Qualitätssicherung weitere Maßnahmen notwendig sind. Auch hier gilt es, sich auf das notwendige Minimum zu beschränken.

### 13.12.3 Einflussfaktoren montagegerechter Produktgestaltung

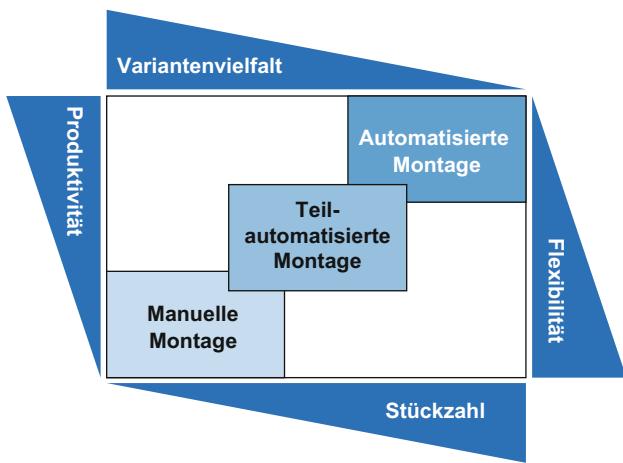
Im vorangegangenen Kapitel wurden die verschiedenen Basisprozesse in der Montage und deren Funktionsumfänge beschrieben. Darauf aufbauend werden im Folgenden verschiedene Einflussfaktoren der montagegerechten Produktgestaltung erläutert.

**Automatisierungsgrad von Montageanlagen** Bei der Durchführung von Montageprozessen ist der Automatisierungsgrad ein Maß für die Anteile an manuellen, teilautomatisierten und vollautomatisierten Prozessschritten am gesamten Montageprozess.

Abbildung 13.103 zeigt, wie sich aus produktseitigen Einflussfaktoren wie Variantenvielfalt und Stückzahl sowie betriebsmittelseitigen Einflussfaktoren wie Flexibilität und Produktivität eine tendenzielle Einordnung bezüglich einer geeigneten Wahl des Automatisierungsgrades gestalten lässt.

Einzelne Einflussfaktoren können sich widersprechen. In einem solchen Fall können Aufteilungen der Montageumfänge sinnvoll sein. Beispielsweise werden Montagelinien in der Variantenproduktion häufig in eine „Automatiklinie“ (wenige Varianten, hohe

**Abb. 13.103** Spektrum industrieller Montageaufgaben – Automatisierungsgrad (Lotter und Wiendahl 2006)



Stückzahl) und eine „Exotenlinie“ (hohe Variantenzahl mit jeweils geringer Stückzahl) aufgespalten.

Die Wahl eines geeigneten Automatisierungsgrades zur Montage des Produktes sollte während der Produktgestaltung Berücksichtigung finden. Das Produkt muss je nach Grad der Automatisierung mit entsprechenden Merkmalen ausgestattet sein, damit es sinnvoll montiert werden kann. Bei einer manuellen Montage liegen in der Regel eher geringe Anforderungen an die montagegerechte Produktgestaltung vor. Bei steigender Automatisierung steigen auch die Anforderungen an die Produktgestaltung. Hier ist auf eine einfache technische Umsetzung zu achten, um die Anlagenkosten gering zu halten und die Prozesssicherheit zu gewährleisten.

Produkte, die automatisierungsgerecht konstruiert wurden, können in der Regel auch manuell gut montiert werden. Die entsprechenden Grundsätze zur Produktgestaltung werden weiter unten behandelt.

**Teilequalität** Eine gleichbleibende Qualität der Zuführteile ist Voraussetzung für eine rationelle Montage. Eine 100 %-Prüfung der Zuführteile ist in vielen Fällen unwirtschaftlich und wird meist durch eine statistische Qualitätskontrolle ersetzt. Insbesondere bei der Schüttgutanlieferung ist der Zustand der Bauteile (Verschmutzung, Beschädigung, ...) ausschlaggebend für die Prozesssicherheit einer automatisierten Vereinzelung. Beimengungen von Fremdkörpern, Abfällen, unvollständigen sowie verschmutzten und verölt Teilen können beim automatischen Zuführen zu erheblichen Problemen und zu Stillständen einer Montagelinie oder eines Montageautomaten führen. Fehlerhafte Zuführteile wirken sich gravierend negativ auf die Wirtschaftlichkeit von automatisierten Montageanlagen aus. Mit steigendem Automatisierungsgrad steigen auch die Anforderungen an die Teilequalität (Lotter und Wiendahl 2006).

**Beschaffenheit von Einzelteilen und Baugruppen** Auch die physikalischen Eigenschaften der Einzelteile und Baugruppen beeinflussen die Montagefähigkeit eines Produktes. Im Besonderen für vollautomatische Montageanlagen muss geprüft werden, ob die Beschaffenheit der Einzelteile und Baugruppen der Beanspruchung während des Montageprozesses standhält. Es können beispielsweise Einzelteile aus Glas oder einer Keramik nicht mit denselben Handhabungsprozessen wie Einzelteile aus unempfindlichem Material manipuliert werden. Auch polierte und vorbehandelte Teileoberflächen müssen aus montagetechnischer Sicht besonders berücksichtigt werden. Solche Teile dürfen beispielsweise meist nicht als Schüttgut gespeichert werden, da die Beschaffenheit der Oberfläche der Einzelteile beschädigt werden könnte und damit ein Qualitätsmerkmal des Produktes nicht mehr erfüllt wäre.

Andere Einzelteile und Baugruppen dürfen nicht schnell bewegt werden, weil sie größere Beschleunigungen nicht unbeschadet überstehen.

Produkte der Halbleiterindustrie oder der Medizintechnik erfordern in vielen Fällen besondere Maßnahmen hinsichtlich der möglichen Kontamination von Oberflächen während der Montage. So werden hier Montageoperationen in Reinräumen unter kontrollierter Atmosphäre oder unter besonderen hygienischen Vorkehrungen durchgeführt.

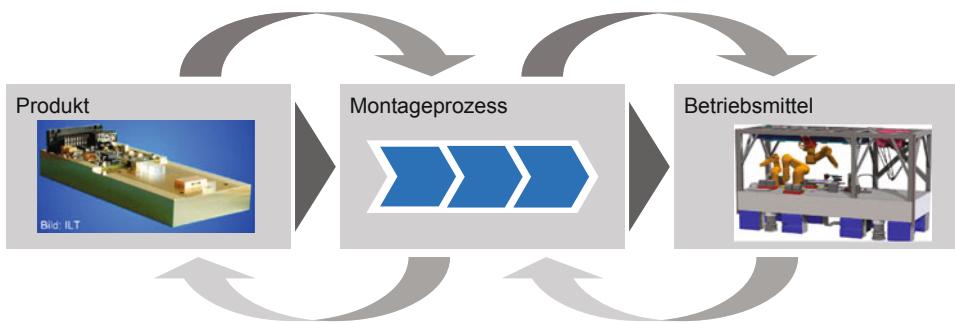
Diese Beispiele verdeutlichen, wie vielfältig die Produkteigenschaften und deren Auswirkungen auf die Montagetechnik sind und dass für die unterschiedlichen Produkteigenschaften entsprechende Prozesse und Betriebsmittel bereitgestellt werden müssen.

### 13.12.4 Gestaltungsgrundsätze für montagegerechte Produkte

Bei der Planung eines Montagesystems sollte das zu montierende Produkt in der Regel der Ausgangspunkt der Überlegungen sein. In Abb. 13.104 werden die Zusammenhänge und Wechselbeziehungen dargestellt. Aus der Produktstruktur lässt sich eine grobe Prozesskette erstellen, auf deren Basis die Wahl der im einzelnen Prozess zur Anwendung kommenden Betriebsmittel erfolgt. Angesichts fester Vorgaben hinsichtlich der Qualität und Ausbringungsmenge sowie des Ziels einer kostenoptimalen Produktion ist jedoch eine strikt unidirektionale Vorgehensweise nicht sinnvoll. Vielmehr sind wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel zu beachten.

Denn die Produktgestaltung hat entscheidenden Einfluss auf die Gestaltung und die Charakteristik der Montageanlage und sollte daher auch an feste Rahmenbedingungen aus den Montageprozessen oder den genutzten Anlagen angepasst werden. Die Produktarchitektur beeinflusst den Anlagenaufbau (Abmaße, Anzahl der Montagestationen, Transporttechnik, . . . ), und die von der Konstruktion gewählte Verbindungstechnik gibt das Fügeverfahren (Automatisierbarkeit, Taktzeit, Prozesskosten, . . . ) vor. Durch die gewählte Bauteilgeometrie werden die Möglichkeiten der Zuführung, Speicherung, Vereinzelung und des Transports indirekt vorgegeben.

Die Zielstellung der montagegerechten Produktgestaltung ist der Versuch, schon während der Konstruktion später notwendige Montageoperationen so zu berücksichtigen, dass



**Abb. 13.104** Abhängigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel in der Montage

das Produkt mit Hilfe von einfachen Montageprozessen und geringem Betriebsmittel-aufwand aufgebaut und in Betrieb genommen werden kann. Dies muss in dem Wissen geschehen, dass dieser Versuch nicht zu einer idealen Lösung, sondern zu einem bestmöglichen Kompromiss aus den Einflüssen der Produktanforderungen, dem Betriebsmittel sowie dem Ressourcenaufwand führt.

Beispielsweise können bereits vorhandene Betriebsmittel eine technisch nicht optimale Lösung für einen Fügeprozess wirtschaftlich dennoch rechtfertigen. Verfügbare Montageprozesse und Betriebsmittel sollten bis in die Produktgestaltung hinein berücksichtigt werden. Dafür ist eine Übernahme der Produktstruktur des Vorgängerproduktes sinnvoll, damit aufgrund eines ähnlichen Montageablaufs die Nutzung verfügbarer Montagestrukturen ermöglicht wird.

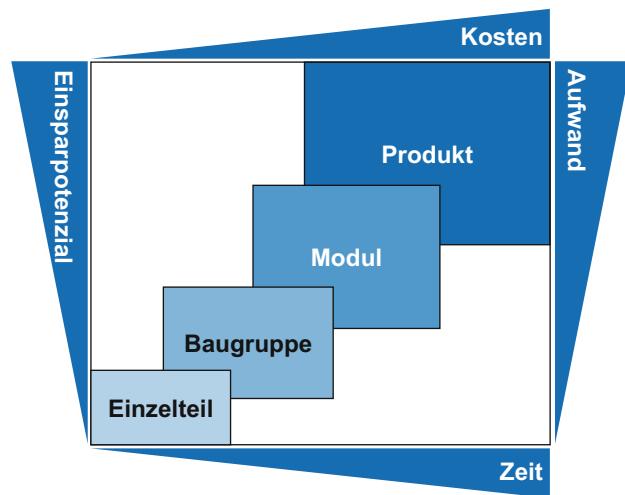
Maßnahmen, die das Ziel der montagegerechten Produktgestaltung verfolgen, lassen sich u. a. nach dem Zeitraum ihrer Auswirkungen, dem möglichen Einsparpotenzial sowie den entstehenden Kosten einteilen. Je weiter ihr Planungshorizont reicht, desto größer ist in der Regel das Einsparpotenzial, aber auch die Komplexität der Änderung. Ferner lassen sich diese Maßnahmen in Bezug auf die Produktstrukturebene, d. h. nach Maßnahmen am Einzelteil, an Baugruppen, an Modulen und am Produktaufbau, unterscheiden (s. Abb. 13.105).

Um den Konstrukteur bei seiner Arbeit zu unterstützen, sind in der einschlägigen Literatur eine große Anzahl von Leitlinien mit teils unterschiedlichen Schwerpunkten dargestellt (Konold und Reger 2003; Hesse 1994; Lotter und Wiendahl 2006; Spur 1986).

Aufgrund der Vielfältigkeit und des Umfanges der Leitlinien ist es nicht immer möglich, alle Empfehlungen vollständig zu realisieren. Daher kommt es vielmehr darauf an, sich während des Konstruierens bewusst daran zu messen, alle erreichbaren Vorteile auszuschöpfen. Konstruieren bleibt ein Prozess des Suchens nach der optimalen Lösung, der durchaus von Kompromissen begleitet ist (Hesse 1994).

Der oberste Gestaltungsgrundsatz der montagegerechten Konstruktion ist das Vermeiden unnötiger Montagevorgänge. Außerdem finden generell alle Gestaltungsmöglichkeiten

**Abb. 13.105** Rationalisierungspotenzial innerhalb der Produktentwicklung



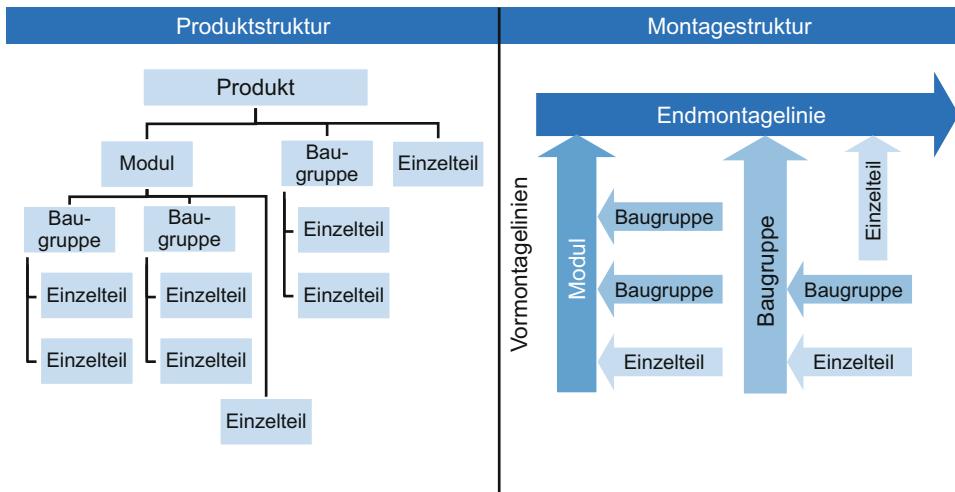
Anwendung, die zu einer kostengünstigen und prozesssicheren Montage des Produktes führen.

Weiterhin gilt, dass insbesondere komplizierte Produkte mehrstufig in Modulen und Baugruppen aufgebaut werden sollten, damit die Montage in Vor- und Endmontage gegliedert werden kann. Dadurch können einzelne komplexe Montageaufgaben gekapselt und übersichtlich in die Vormontage ausgelagert werden. So werden beispielsweise im Automobilbau Cockpits oder Sitze vormontiert und funktionsgeprüft an die Endmontagelinie gebracht, damit sie als fertiges Modul eingebaut werden können und die Komplexität der Endmontagelinie verringert wird. Die Verlagerung von Montageumfängen in die Vormontage bietet folgende Vorteile:

- Reduzierung der Durchlaufzeit,
- Entkopplung von Nebenlinien,
- Verbesserung der Zugänglichkeit und Automatisierbarkeit in der Vormontage,
- Verwendung abgestimmter und kleinerer Transportvorrichtungen unabhängig von der Hauptmontagelinie und
- Möglichkeit der Verlagerung von Montageumfängen auf Zulieferbetriebe.

In Abb. 13.106 wird eine Produkt- und Montagestruktur beispielhaft gegenübergestellt. Die Produktstruktur zeigt die Gliederung aller Einzelbauteile, Baugruppen und Module des Produktes. Module bestehen aus mehreren Baugruppen, die im besonderen Maße einen abgeschlossenen Aufbau besitzen und eine primäre Funktion des Produktes erfüllen. Die Produktstruktur gibt dabei indirekt die Aufteilung in Endmontage- und Vormontagelinien vor.

Die Differenzierung von Baugruppen und Modulen kann zur Variantenbildung genutzt werden. Für solche variantenbildende Baugruppen und Module sollten die Schnittstel-



**Abb. 13.106** Gegenüberstellung von Montage- und Produktstruktur

len zum Basisprodukt jeweils gleich gestaltet sein, um auf gemeinsame Montageprozesse zurückgreifen zu können (Eversheim 1980).

Durch eine späte Differenzierung der Varianten innerhalb der Endmontage wird das Variantenmanagement vereinfacht (Wiendahl et al. 2004). Große Teile der Montagelinie arbeiten dann nämlich mit einer geringeren Variantenzahl, dadurch sinkt die notwendige Flexibilität innerhalb der Anlage und damit auch die Kosten.

**Grundsätze zur Einzelteilgestaltung** Einzelteile werden zu Baugruppen oder an Baugruppen bzw. Module montiert. Sie bilden die niedrigste Bauteilebene innerhalb der Montage. Gestaltungsregeln für Einzelteile dienen vor allem der Erleichterung von Handhabungsprozessen wie dem Greifen, Spannen, Aufnehmen sowie dem Unterstützen von Fügeoperationen durch konstruktive Maßnahmen zum Toleranzausgleich.

Folgende Aufforderungen beschreiben einige Grundsätze zur Einzelteilgestaltung:

- verwende Standard- und Normteile, möglichst Gleichteile,
- integriere Komponenten zur Reduzierung der Teileanzahl,
- vermeide oder erleichtere Orientierungsvorgänge durch gut erfassbare Merkmale an der Außenkontur,
- wähle automatisch montierbare Verbindungsmittel,
- verwende Fließgut (Band) vor Stückgut (Einzelteile),
- unterstütze das Zusammenstecken von Teilen (Fügehilfen),
- siehe Ausgleichshilfen für die Montage von Einzelteilen vor,
- vereinheitliche Fügestellen,
- ermögliche eine stabile Handhabung und
- vermeide das Positionieren und Ausrichten von Bauteilen, wenn sie als Satz angeliefert und montiert werden können.



**Abb. 13.107** Gestaltungsgrundsätze zur Einzelteilgestaltung (Konold und Reger 2003; Hesse 1994; Lotter und Wiendahl 2006)

In Abb. 13.107 sind einige Beispiele aus den Grundsätzen zur Einzelteilgestaltung grafisch dargestellt. Durch eine geeignete Gestaltung von Einzelteilen können Justage-, Handhabungs-, und Fügevorgänge unterstützt werden.

Beispielsweise werden bei der Fertigung von Einzelteilen bestimmte Konturen geschaffen. Mit Hilfe dieser Konturen können während der Montage Einzelteile zueinander ausgerichtet werden. Eine solche Maßnahme unterstützt die Genauigkeit der Zuordnung zweier Einzelteile deutlich und wird als passive Justage (s. o.) bezeichnet. Wird die Ausrichtung zweier Einzelteile durch ihre Formgebung passiv unterstützt, können beispielsweise Fügeoperationen wie das Schweißen mit einer höheren Prozesssicherheit durchgeführt werden, weil die Einzelteile gegen ein mögliches Verrutschen gesichert sind. Außerdem können Einzelteile mit Funktions- bzw. Gleitflächen ausgestattet werden, die der Vereinfachung der Montageprozesse dienen.

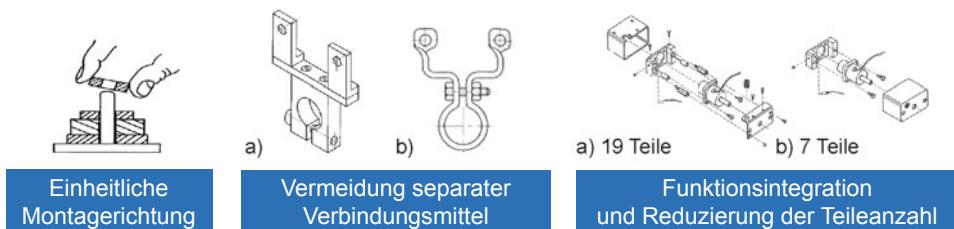
**Grundsätze zur Baugruppengestaltung** Um die Endmontage zu entlasten, werden die Montageumfänge einzelner Baugruppen in Vormontagen verlagert. Solche Baugruppen bilden mechanische Einheiten, die aber – im Gegensatz zu Modulen (s. u.) – für sich genommen nur Teilfunktionen des Produktes erfüllen.

Folgende Aufforderungen beschreiben Grundsätze zur Baugruppengestaltung:

- reduziere die Teileanzahl, z. B. durch Funktionsintegration,
- strebe nach rationellen Verbindungsverfahren, wie z. B. Snap-in-Verbindungen,
- vermeide separate Verbindungsmittel,
- gestalte Wiederholbaugruppen,
- minimiere die Montagerichtungen, strebe einfache Bewegungsmuster an und
- vermeide Montagefehler durch Methoden, wie z. B. Poka Yoke.

Außerdem muss eine ausreichende Zugänglichkeit und ein flexibles Schnittstellendesign für spätere Montageoperationen berücksichtigt werden. In Abb. 13.108 sind einige Grundsätze zur Baugruppengestaltung grafisch dargestellt.

Grundsätzlich muss bei den Gestaltungsrichtlinien unterschieden werden, ob Produkte mit kleiner oder großer Stückzahl montiert werden. Beispielsweise wird bei der Einzelmontage einer Baugruppe im Sondermaschinen- oder Anlagenbau die Verwendung separater Verbindungsmittel geduldet (s. Abb. 13.108, mittleres Beispiel), wenn



**Abb. 13.108** Gestaltungsgrundsätze zur Baugruppengestaltung (Boothroyd 2005; Hesse 1994)

dadurch auf Standardbauteile a) zurückgegriffen werden kann und keine Einzelteile mit komplexer Geometrie b) gefertigt werden müssen. Für die Großserienmontage sind entsprechende Investitionen in spezifische Betriebsmittel dagegen sinnvoll, wenn die Anzahl an Montageschritten entsprechend reduziert wird.

**Grundsätze zur Modulgestaltung** Um der steigenden Komplexität heutiger Produkte Rechnung zu tragen, sind Module als weiteres Element der Produktgestaltung zu berücksichtigen. Module bestehen aus mehreren Baugruppen und Einzelteilen. Ihnen werden einzelne Funktionalitäten des Produktes zugeordnet, die innerhalb des Moduls erfüllt werden können. Module besitzen definierte Schnittstellen, die deren Einbau – aber auch deren Inbetriebnahme der Einzelfunktionen unabhängig vom Gesamtprodukt – ermöglichen (z. B. Fahrzeugsitze).

Module können montagetechnisch häufig als eigenständige Produkte betrachtet werden. Sie durchlaufen einen kompletten Montageprozess und werden in der Regel vollständig in Betrieb genommen. Sie sind so weit ausgeprägt, dass sie justiert, parametriert und während einer Funktionsprüfung vorgetestet werden. Sie werden als abgeschlossenes System entwickelt und häufig von Zulieferbetrieben montiert und an die Hauptmontagelinie zugeführt.

In Abb. 13.109 sind verschiedene Module aus dem Bereich der Automobilmontage abgebildet. Die Module sind Einheiten, die als vormontierter Verbund in das Fahrzeug eingebaut werden. Neben Modulen für den Innenraum (beispielsweise Sitze, Cockpit), die schon seit einiger Zeit vorgeprüft und montagebereit an die Montagelinie gebracht werden, werden beispielsweise auch Frontend-, Tür- und Achsbaugruppen als Module vormontiert. Der Anteil der Modulmontage im Automobilbau steigt weiter an und nimmt Einfluss auf den kompletten Aufbau des Fahrzeuges. Andere Branchen – z. B. die Steuerungs- und Rechnertechnik, die Haushaltsgerätetechnik und der Maschinenbau – bedienen sich ebenfalls unterschiedlicher Modulkonzepte, um die Montage zu vereinfachen.

**Grundsätze zur Produktgestaltung** Im Vergleich zur Einzelteil-, Baugruppen-, und Modulgestaltung liegt in der Produktgestaltung das größte Rationalisierungspotenzial (s. Abb. 13.105). Einige Grundsätze zur Produktgestaltung sind:



### Beispiele für Modulumfänge

Cockpit



Sitze



Frontend



Türen



Achse



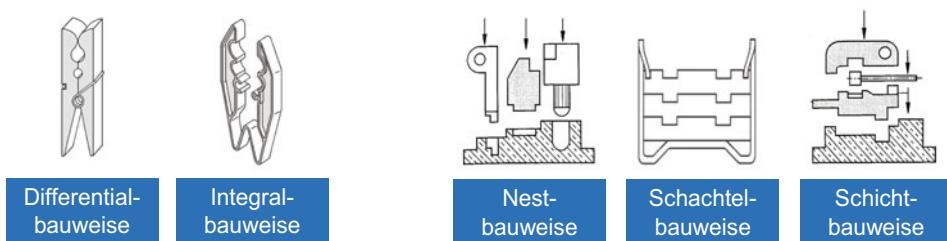
**Abb. 13.109** Beispiele für Modulumfänge in der Automobilmontage (Meißner 2009; AUD 2010)

- wähle eine günstige Produktstruktur,
- gestalte ein montagegünstiges Basisteil (Chassis-Prinzip),
- gliedere in eigenständige Baugruppen und Module und verlagere dadurch Endmontageumfänge in die Vormontage,
- schränke die Variantenvielfalt ein,
- vermeide Montageoperationen,
- gestalte roboter- bzw. greiffreundlich,
- stelle Freiräume für die Montageoperationen zur Verfügung,
- gestalte verpackungs- und transportfreundlich und
- gestalte demontage- und recyclingfreundlich.

Hier sei nochmals gesagt, dass der Versuch, alle Gestaltungsgrundsätze vollständig zu erfüllen, in den meisten Fällen nicht zu einem praktikablen und wirtschaftlichen Ergebnis führt, weil nicht alle Forderungen miteinander vereinbar sind. Daher muss ein tragfähiger Kompromiss für die Produktgestaltung gefunden werden, bei dem jene Gestaltungsgrundsätze berücksichtigt werden, die eine optimale Montageablauf- und Montageprozessplanung gewährleisten.

Zusätzlich zu den beschriebenen Gestaltungsgrundsätzen, sind in Abb. 13.110 verschiedene Bauweisen als Basis für eine jeweils montagegerechte Produktstruktur vorgestellt und im Folgenden genauer erläutert.

Grundsätzlich kann ein Produkt in differentialer oder integraler Bauweise aufgebaut werden (Abb. 13.110 links). Bei der Differentialbauweise wird die Produktstruktur in Ein-



**Abb. 13.110** Bauweisen für eine montagegerechte Produktgestaltung (Konold und Rege 2003; Hesse 1994; Lotter und Wiendahl 2006)

zelteile untergliedert, die mit Verbindungselementen gefügt werden. Durch eine Demontage des Produktes wird der Austausch defekter Bauteile ermöglicht. Besonders für kostspielige und langlebige Produkte, bei denen ein Austausch von Einzelteilen, Baugruppen oder Modulen sinnvoll ist, wird die Differentialbauweise verwendet.

Die Integralbauweise vereint alle Funktionen des Produktes (bzw. eines Moduls oder einer Baugruppe) in einem Bauteil, dadurch entfallen sämtliche Montageoperationen. Eine solche Bauweise kann insbesondere bei einfachen Produkten, die in hoher Stückzahl hergestellt werden, wirtschaftlich sein.

Neben den verschiedenen Produktstrukturen ist auch eine Unterscheidung der konstruktiven Lösungen notwendig (s. Abb. 13.110 rechts).

Bei der Nestbauweise werden Einzelteile oder Baugruppen nebeneinander, wie beispielsweise bei der Bestückung einer elektronischen Leiterplatte, angeordnet. Die Reihenfolge der Montage ist weitestgehend frei wählbar. Daraus ergibt sich eine große Anzahl akzeptabler Prozessvarianten und Optimierungsansätze durch Variation der Montagereihenfolge.

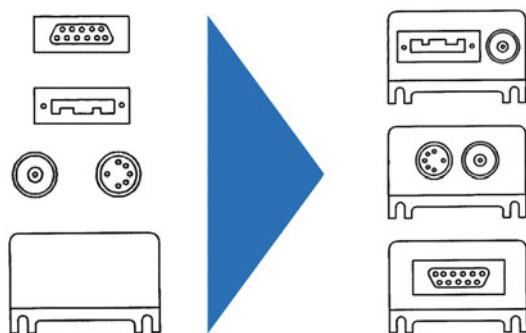
Innerhalb der Schachtelbauweise werden die Einzelteile in ein Basisteil eingelegt und durch ein abschließendes Bauteil vor dem Herausfallen gesichert und ggf. vor Umwelteinflüssen geschützt.

Die Schichtbauweise zeichnet sich durch das Aufeinanderstapeln von Einzelteilen und Baugruppen aus. Die zu montierenden Teile zentrieren sich im Idealfall selbstständig am Basisteil bzw. am zuvor montierten Bauteil. Die Reihenfolge der Montage ist in der Regel nicht veränderbar. Das Beispiel zeigt in abstrahierter Weise die Formelemente zur Selbstzentrierung und das Vermeiden des zusätzlichen Sicherns der Montageteile beim Fügen. In vielen Produkten lässt sich auch ein Mix dieser Bauweisen erkennen (Lotter und Wiendahl 2006).

Maßnahmen, die nicht nur ein Einzelprodukt, sondern auch dessen Varianten und Abwandlungen berücksichtigen, sind beispielsweise Baukastenprinzipien und Plattformkonzepte. Eine auf einem Baukasten basierende Produktfamilie zeichnet sich durch einen modularen Aufbau aus. Die einzelnen Module sind aufeinander abgestimmt und können zu verschiedenen Varianten und Ausführungen eines Produktes kombiniert werden, ohne technischen Mehraufwand von der Montageanlage zu fordern (s. Abb. 13.111).

Plattformkonzepte sind eine weitere Möglichkeit zur produktübergreifenden Gestaltung. Die Plattform bildet dann die technische Basis des Produktes und besteht

**Abb. 13.111** Baukastenprinzip (Hesse 2003)



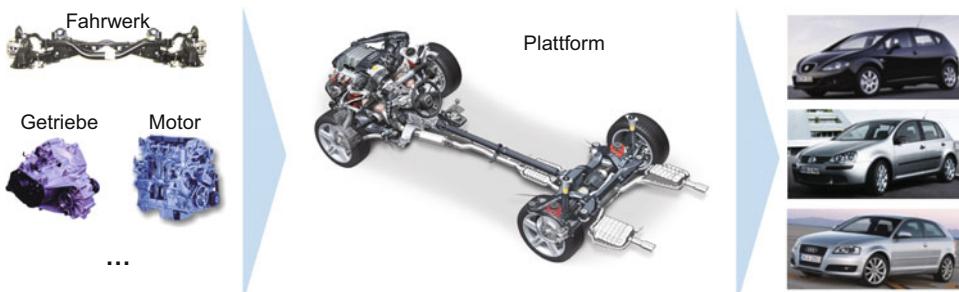
beispielsweise im Automobilbau hauptsächlich aus Bauteilen des Unterbaus und des Fahrwerks, die bis zu 60 % der Fahrzeugkosten ausmachen können. Abbildung 13.112 zeigt ein Plattformkonzept, das über die Karosserie sowie weitere Baugruppen und Module zu unterschiedlichen Varianten und Fahrzeugmarken ausgebaut werden kann. Die gemeinsam genutzte Plattform wird vom Kunden meist nicht wahrgenommen.

Um eine große Variantenvielfalt bei gleichzeitig geringen Produktionskosten erreichen zu können, werden die für jede Marke unterschiedlichen Module mit einer hohen Anzahl an Gleichteilen gefertigt. Die große Variantenvielfalt wird durch solche Plattformkonzepte erst möglich. Gleichzeitig können Entwicklungs- und Fertigungskosten auf Grund der Skaleneffekte gesenkt werden.

Ähnliche Ansätze gibt es in der Elektronikindustrie und in vielen weiteren Branchen.

**Berücksichtigung mechatronischer Strukturen innerhalb der Montage** Für eine montagefreundliche Konstruktion müssen immer häufiger mechatronische Strukturen des Produktes berücksichtigt werden. Dabei ist zu beobachten, dass nicht nur die mechanischen, sondern auch die elektronische und softwaretechnische Konstruktion erheblichen Anteil an der Funktionserfüllung des fertigen Produktes haben. Daher wird die Entwicklung der jeweiligen Fachgebiete Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik aufeinander abgestimmt, damit das Endprodukt die gewünschte Qualität und Funktionalität erreichen kann.

Wie in Abb. 13.113 beschrieben, werden im ersten Schritt der Produktentwicklung eine Analyse der gewünschten Eigenschaften und ein Entwurf des Produktaufbaus durchgeführt. Es werden Verantwortlichkeiten identifiziert, die für die Funktion und Qualität des Produktes notwendig sind. Die Verantwortlichkeiten ermöglichen eine von der Technik abstrahierte Beschreibung, die das Produkt in einzelne verständliche Module zerlegt, denen die Verantwortlichkeiten zugeordnet werden. Die abstrahierte Beschreibung unterstützt das Verständnis der oftmals komplexen Produkte und der möglichst gemeinsamen Konstruktion in den Disziplinen Mechanik, Elektrik und Softwaretechnik. Ausgehend von der Analyse, der Identifikation und der Zuordnung der Verantwortlichkeiten kann der übergreifende mechatronische Entwicklungsprozess des Produktes erfolgen. Hierbei werden



**Abb. 13.112** Plattformkonzept in der Automobilmontage (Meißner 2009; AUD 2010)

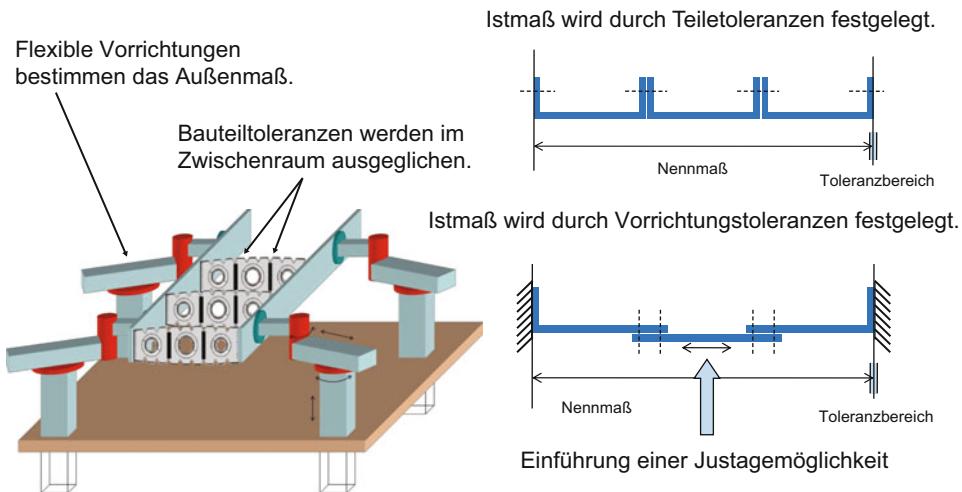


**Abb. 13.113** Analyse für die integrative Produktentwicklung. (Angelehnt an VDI 2206 2004)

zunächst abstrakte Methoden bestimmt, mit denen die Module ihren Verantwortlichkeiten nachkommen. Erst in der anschließenden Phase werden hierfür konkrete technische Umsetzungsmöglichkeiten stückweise detailliert. Anschließend wird die Strukturierung des Produktes in Module, Baugruppen und Einzelteile durchgeführt und ein Montagekonzept erarbeitet. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist ein mechatronisches Produkt, welches aus klar abgegrenzten Modulen zur Erfüllung der Produktfunktionen und zur Strukturierung der Montageabläufe besteht. Daraus ergibt sich fast zwangsläufig ein einfaches Montagekonzept.

**Toleranzmanagement in der Montage** Innerhalb der Produktgestaltung muss die Genauigkeit von Fertigungs- und Montageverfahren berücksichtigt werden. Ein geeignetes Toleranzmanagement kann die Fertigung, aber auch die Montage deutlich vereinfachen, weil großzügige Toleranzvorgaben die Montagekosten durch die Verwendung einfacher Prozesse und Betriebsmittel verringern. Insbesondere die Wahl einer geeigneten Montagereihenfolge und eine intelligente Anordnung von Einzelteilen und Baugruppen können zu einem montagefreundlichen Toleranzmanagement beitragen, welches durch kostengünstige Montageoperationen realisiert werden kann.

Die Toleranzfestlegung ist demnach mit der Produktgestaltung nicht abgeschlossen, sondern muss über die Prozessgestaltung und Betriebsmittelwahl weitergeführt werden. Auch hier werden jedoch bei der Produktgestaltung schon die wesentlichen Rahmenbedingungen festgelegt.



**Abb. 13.114** Toleranzmanagement am Beispiel der Flugzeugmontage (hier: Seitenleitwerk)

Zur toleranzgerechten Produktgestaltung gehören folgende Vorgehensweisen:

- Verzicht auf lange Toleranzketten und damit auf die Bestimmung des Istmaßes aufgrund der Summierung von Bauteiltoleranzen,
- Schaffung von Justagemöglichkeiten zur Einhaltung der Toleranzvorgaben durch:
  - Fertigung von Einzelteilen mit großzügigen Toleranzen und anschließender Sortierung in Toleranzgruppen, zur Auswahl zueinander passender Einzelteile für den Montageprozess (Toleranzanpassung),
  - Messung der Abweichung vom Sollmaß und Ausgleich durch Einbau eines dickenvariablen Normteils beim Fügen zweier Einzelteile (Beispiel: Verwendung von Passscheiben) und
  - Ausgleich von Toleranzen an einer zu montierenden Baugruppe durch nachgiebige Elemente wie beispielweise Druckfedern.

Abbildung 13.114 zeigt ein Beispiel zum Toleranzmanagement. Ein Großbauteil – hier der Kasten eines Flugzeugseitenleitwerks – wird aus drei Einzelteilen zusammengesetzt. In der oberen Skizze wird das Istmaß des zusammengefügten Bauteils durch die Summierung der Einzeltoleranzen vorgegeben. Dadurch resultieren hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und eine Steigerung der Fertigungskosten. Im unteren Beispiel ist die Toleranzkette verändert. Die Einzelteile können so aufgebaut werden, dass das Großbauteil nach dem Fügeprozess innerhalb des Toleranzbereiches liegt. Dadurch kann der Toleranzbereich in Bezug auf das Nennmaß auch bei weniger präzise gefertigten Einzelteilen eingehalten werden. Die Justage erfolgt passiv in einer flexiblen Vorrichtung und das Istmaß kann durch die Ausgleichsmöglichkeit im mittleren Bauteil im Toleranzbereich gehalten werden. Die Toleranzkette ist dadurch verkürzt.

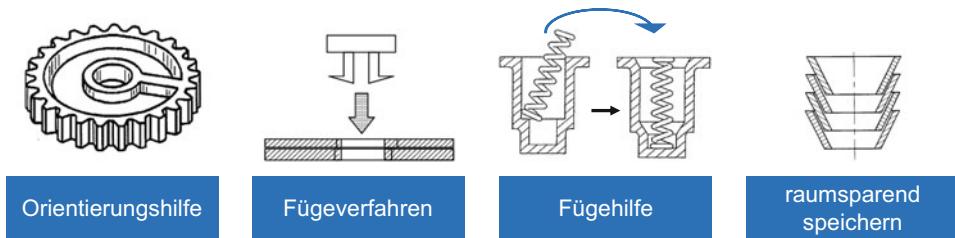
		Schwierigkeitsgrad				
		Kugel	Stange	Flachteil	Pilzteil	Wirrteil
Schwierigkeitsgrad	Grundform/ Form- ele mente					
	Teile mit glatter Außenform					
	Merkmale in der Innen- und Außenkontur					
	Werkstücke mit exzentrischen Elementen					
Schwierigkeitsgrad	Unregelmäßig zusammengesetzte Formen					

**Abb. 13.115** Handhabungsgerechte Bauteilgeometrien (Lotter und Wiendahl 2006)

**Grundsätze zur handhabungsgerechten Produktgestaltung** Der handhabungsgerechten Produktgestaltung geht eine Analyse von Bauteileigenschaften und Bauteilmerkmalen zur Identifikation bekannter Montageprozesse voraus. Zahlreiche Eigenschaften von Bauteilen haben Einfluss auf deren Verhalten bei der Handhabung. Wesentliche Eigenschaften sind Geometrie, Masse, Werkstoff sowie Bearbeitungszustand und Oberflächenbeschaffenheit. Durch eine Klassifizierung der Bauteile nach ihren Eigenschaften lassen sich Rückschlüsse auf das Verhalten bei der Handhabung ableiten. Durch eine konsequente Klassifizierung in Bauteileigenschaften und -verhalten können bekannte Montageprozesse und Betriebsmittel verwendet werden. Wie in Abb. 13.115 dargestellt, hat die Geometrie der Bauteile einen erheblichen Einfluss auf den Schwierigkeitsgrad der Handhabung.

Handhabungsgerechte Produktgestaltung konzentriert sich auf die Optimierung des Verhaltens der Bauteile bei der Bereitstellung und bei der Zuführung. Bauteile sollen durch konstruktive Maßnahmen raumsparend gespeichert und durch eine minimierte Verwirrneigung möglichst einfach aus dem Speicher entnommen und dem Montageprozess zugeführt werden können. Durch ausgeprägte Symmetrien der Bauteile kann der notwendige Ordnungsgrad oft mit reduziertem Aufwand erreicht werden. Das Erreichen hoher Ordnungsgrade wird durch ausgeprägte Asymmetrien vereinfacht.

**Grundsätze zur automatisierungsgerechten Produktgestaltung** Die Grundsätze für das automatisierungsgerechte Gestalten gewinnen immer stärker an Bedeutung. Die montage- und handhabungsgerechten Gestaltungsgrundsätze werden zunehmend um solche ergänzt, die der Automatisierung von Montageabläufen dienlich sind. Die Herausforderung liegt



**Abb. 13.116** Automatisierungsgerechte Produktgestaltung (Konold und Reger 2003; Brecher und Schuh 2010)

darin, während der frühen Konstruktionsphase des zu montierenden Produktes eine detaillierte Anforderungsbeschreibung der Montageabläufe des Bauteils bereitzustellen, auf deren Grundlage die automatisierungsgerechte Produktgestaltung durchgeführt wird.

Für eine voll automatisierte Montage von Einzelteilen oder Baugruppen bedarf es einer Produktgestaltung mit deutlichen Merkmalen für prägnante Orientierungs- und Fügeabläufe. Mit Hilfe von mechanischen Produktmerkmalen kann bei Ausrichtvorgängen, die bei der manuellen Montage visuell vorgenommen werden, z. B. auf kostenintensive Bildverarbeitungstechnologien verzichtet werden.

Des Weiteren wird durch die Reduzierung von Fügeoperationen, Montagerichtungen und den Einsatz von z. B. Clipsen anstatt Schraubverbindungen der Aufwand des automatischen Fügens von Einzelteilen reduziert. Es bleibt aber zu beachten, dass die Demontagefähigkeit des Produktes durch die Wahl der Fügeoperation beeinflusst werden kann (siehe auch weiter oben). Das Ermöglichen und Vereinfachen des automatischen Speicherns und Handhabens steigert ebenfalls das Rationalisierungspotenzial erheblich. Einige der genannten Maßnahmen zur automatisierungsgerechten Produktgestaltung sind in Abb. 13.116 grafisch dargestellt.

Im Vergleich zur manuellen Montage, bei der mit geringem Aufwand konstruktive Fehler durch die Flexibilität des Menschen ausgeglichen werden können, entsteht durch solche Fehler im Falle automatisierter Montageanlagen oft ein erheblicher Mehraufwand für Produkt und Prozessänderungen. Es werden komplexe Handhabungs- und Fügeoperationen benötigt, um eine montageungünstige Konstruktion auszugleichen. Ein weiterer Nachteil innerhalb der automatisierten Montage ist, dass Fehler vorgelagerter Bearbeitungsstufen häufig schwer zu erkennen und zu beheben sind, wenn die Fehlermöglichkeit bei der Montageplanung nicht explizit berücksichtigt wurde.

Zur Vereinfachung von Prüf- und Einstellmöglichkeiten benötigen automatisierte Anlagen im Vergleich zur Produktgröße meist große Bewegungsfreiraume zur Erfassung von Messgrößen. Für Justagevorgänge sind die Beschaffbarkeit geeigneter Messmittel und ein einfacher Zugang zu Einstellmöglichkeiten zu gewährleisten.

**Demontagefreundliche Produktgestaltung** Die demontagefreundliche Produktgestaltung nimmt innerhalb der Konstruktion eine immer wichtigere Rolle ein, weil die

Notwendigkeit zur Demontage von Produkten schon in der frühen Entwicklungsphase eindeutig identifiziert wird:

- Durch eine zerstörungsfreie Demontage von Baugruppen und Einzelteilen können Bauteile nach der Produktlebenszeit wiederverwendet werden.
- Reparaturen und der Austausch von Verschleißteilen werden durch eine zerstörungsfreie Demontage ermöglicht.
- Die Demontagezeit ist ein wirtschaftlicher Faktor für die Wartung und Instandhaltung.
- Die Möglichkeit der Zerlegung von Altprodukten nach gleichen Werkstoffen führt zu einer effizienten Rückführung der Rohstoffe in den Recyclingprozess.

Eine demontagefreundliche Montage wird durch folgende Grundsätze beschrieben:

- Verbindungselemente minimieren und gut zugänglich gestalten,
- Art und Anzahl unterschiedlicher Demontageverfahren reduzieren,
- Bauteile und Baugruppen standardisieren und kennzeichnen,
- Teileanzahl minimieren und
- lösbare Verbindungselemente einsetzen (s. auch Abschn. 13.12.4).

In der Europäischen Union (EU) sind inzwischen nahezu alle Umweltbereiche durch das Gemeinschaftsrecht erfasst, so auch auf dem umfangreichen Gebiet der Abfallwirtschaft. Bei der EU-internen Abstimmung über Ziele und Maßnahmen ist Deutschland in der EU häufig Vorreiter und Motor bei der Entwicklung hoher europäischer Standards. Innerhalb der bestehenden Regelungen existieren eine Abfallrahmenrichtlinie, Abfallverbringungsverordnung, Altautorichtlinie, Altölrichtlinie, Batterierichtlinie, Elektro- und Elektronikaltgeräte-Richtlinie, Deponierichtlinie, Verpackungsrichtlinie und eine Richtlinie zur Beseitigung von PCB/PCT. Des Weiteren werden der Transport von Abfällen, die Müllverbrennung und die Demontage von Schiffen, Fahr- und Flugzeugen usw. geregelt ([BMU 2010](#); [European Comission Environment 2010](#)). Weiterhin bestehen Richtlinien vom Verein Deutscher Ingenieure zur Demontage und Wiederverwendung von Produkten. Beispielhaft seien das Recycling in der technischen Gebäudeausrüstung (VDI Richtlinie 2074 [2010a](#)), das Recycling elektrischer und elektronischer Geräte (VDI [2010c](#)) und eine Handlungsempfehlung zur Beurteilung der Qualität von Kfz-Gebrauchteilen (VDI Richtlinie 4080 [2010c](#)) genannt.

### 13.13 Instandhaltungsgerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

#### 1. Zielsetzung und Begriffe

Technische Systeme und Produkte, wie Anlagen, Maschinen, Geräte und funktionsfähige Baugruppen, unterliegen durch den Gebrauch einer Abnutzung oder einem Verschleiß, einer Gebrauchsdaerminderung, einer Veränderung der zeitabhängigen Werkstoffkennwerte, z. B. Versprödung, und ähnlichen Erscheinungen. Sie erleiden Korrosion und eine gewisse Verschmutzung. Nach einer bestimmten Gebrauchs- und auch Stillstandzeit entspricht der Istzustand nicht mehr dem beabsichtigten Sollzustand. Die Abweichung vom Sollzustand ist häufig nicht direkt erkennbar und kann zu Störungen, Betriebsunterbrechungen und Gefahren führen. Durch diese Umstände können die Funktionsfähigkeit, die Wirtschaftlichkeit und die Sicherheit bedeutend beeinträchtigt werden. Plötzliche Ausfälle stören den normalen Betriebsablauf, und ihre außerplanmäßige Beseitigung ist sehr kostenintensiv. Das unkontrollierte Erreichen einer Schadengrenze, möglicherweise verbunden mit Unfällen, ist aus humanen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht akzeptabel.

Die Instandhaltung als *vorausschauende und vorbeugende Maßnahme* hat angesichts größer und komplexer werdender Systeme, Anlagen und Maschinen eine zunehmende Bedeutung erlangt. Der Konstrukteur beeinflusst sie nach Aufwand und Ablauf sehr maßgebend bereits durch die gewählte prinzipielle Lösung, wie aber auch durch die Gestaltung im Einzelnen. Er verleiht damit nach (DIN 31051; VDI 2246 1994) dem Produkt eine *Instandhaltbarkeit*. Im Rahmen des methodischen Vorgehens ist bei den Leitlinien mit Hauptmerkmalslisten und mit Hauptmerkmalen zum Bewerten in der Konzeptphase und ihrer Anwendung in Verbindung mit den Grundregeln (vgl. 11) schon recht intensiv auf die Bedeutung der Instandhaltung und der Berücksichtigung entsprechender Anforderungen aufmerksam gemacht worden. Neuere Veröffentlichungen (Jagodejkin 1997; Kljajin 1997) unterstreichen die Bedeutung eines methodischen Vorgehens und eine frühe Berücksichtigung schon in der Konzeptphase.

Instandhaltungsmaßnahmen berühren oder umfassen sehr häufig auch Fragen der Sicherheit (vgl. 11.3), Ergonomie (vgl. 13.8) und Montage (vgl. 13.12), so dass die in diesem Buch zu den genannten Gebieten bereits gegebenen Hinweise und Regeln beträchtliche Aspekte zur Instandhaltung einschließen. Deshalb wird in diesem Abschnitt nur noch ergänzt, was zum allgemeinen Verständnis und zur Entwicklung einer instandhaltungsgerechten Lösung notwendig erscheint.

DIN 31051 versteht unter *Instandhaltung*: „Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustands sowie zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes von technischen Mitteln eines Systems“.

Die Maßnahmen, die hierzu getroffen werden können, sind

- *Wartung* als Maßnahmen der Bewahrung des Sollzustandes,
- *Inspektion* als Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes und
- *Instandsetzung* als Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes.

Art und Weise, Umfang und Dauer von Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen hängen selbstverständlich von Objekt und Art seiner Funktionserfüllung, von der geforderten Verfügbarkeit und daraus resultierenden Zuverlässigkeit, vom Gefahrenpotenzial und ähnlichen Gesichtspunkten ab. Die Lösung und die Betriebsweise bestimmen auch, ob z. B. Wartungen und Inspektion nach einem festen zeitlichen Intervall, nach bestimmten Betriebsstunden oder in Abhängigkeit von der gemessenen Belastungs- und Beanspruchungshöhe während des Gebrauchs vorgenommen werden.

Die *Instandhaltungsstrategie* wird weiterhin vom Verlauf des Zustandsrückgangs der beteiligten Komponenten, z. B. Verschleiß, Gebrauchsdaumerminderung u. a. beeinflusst, wobei die den Sollzustand wiederherstellenden Maßnahmen vor Erreichen der jeweiligen Ausfallgrenzen durchgeführt werden müssen. Dementsprechend wird unterschieden in

- *Ausfallbedingte Instandsetzung*, die erst nach dem Ausfall einer Komponente durchgeführt wird. Diese Strategie wird angewandt und stellt die einzige Möglichkeit dar, wenn der Ausfall nicht vorhersehbar und zugleich nicht gefahrbringend ist. Der Nachteil ist das plötzliche, unerwartete Auftreten, das keine Planung zulässt. Beispiel: Bruch der Windschutzscheibe beim Auto. In Produktionsanlagen und bei Situationen unbedingter Funktionserfüllung sowie Gefahrenverbundenheit ist diese Strategie nicht tauglich.
- *Präventive Instandsetzung* wartet nicht auf den Ausfall, sondern betreibt die Instandsetzung vorsorglich. Hierbei kann zwischen *intervallbedingter* und *zustandsbedingter* Instandsetzung unterschieden werden. Intervallbedingte Instandsetzung erfolgt in festen Intervallen nach Zeitablauf, Wegstrecke oder Anzahl produzierter Einheiten (z. B. Ölwechsel nach 20.000 km Fahrtstrecke). Die zustandsbedingte Instandsetzung setzt das Erfassen (Messen) des eingetretenen Zustands in Abhängigkeit von gefahrener Leistung bzw. aufgebrachter Arbeit, erreichter Temperatur usw. voraus und leitet dann nach Erreichen eines unerwünschten Zustands die Wartungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahme ein, z. B. Ölwechsel beim Auto nach einer Anzahl gewisser Kaltstarts und erreichter integrierter, mittlerer Temperaturhöhe wegen eingetretener Ölalterung oder Ersatz von Belägen nach aufgetretenem Verschleiß, z. B. an Bremsen oder Kupplungen. Ob die intervallbedingte oder zustandsbedingte Strategie angewandt wird, hängt von den Betriebsumständen ab, wobei auch eine Mischform denkbar ist. So wird z. B. in einem Kraftwerk für die Sicherstellung von Grundlast die intervallbedingte, nach Zeitablauf gewählte Instandsetzung in Frage kommen, wobei einige Komponenten zustandsbedingt betrachtet werden können, wenn diese mehrere Intervalle überleben können.

Grundsätzliches zu Instandhaltungsstrategien ist bei van der Mooren (1991) und VDI-Richtlinie 2246; Blatt 1 (VDI 2246) sowie zum Verlauf von Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit von Komponenten bei Rosemann (1981) zu finden zu finden.

## 2. Instandhaltungsgerechte Gestaltung

Bereits in der Anforderungsliste sollten instandhaltungsrelevante Anforderungen festgehalten werden (vgl. VDI 1994; Blatt 2). Bei der Lösungsauswahl sind Varianten zu bevorzugen, die gleichzeitig eine einfache Instandhaltung, z. B. durch Wartungsfreiheit,

einfachen Austausch, Komponenten gleicher Gebrauchsduer usw. fördern. Bei der Gestaltung ist auf gute Zugänglichkeit sowie geringen Montage- und Demontageaufwand zu achten. Instandhaltungsmaßnahmen dürfen keine sicherheitsgefährdenden Zustände bewirken.

Grundsätzlich sollte nach van der Mooren (1991) eine Lösung die *Präventionsfreiheit* fördern, d. h., eine technische Lösung sollte so wenig wie möglich vorbeugende Maßnahmen erfordern. Dies wird angestrebt durch völlige Wartungsfreiheit, durch Komponenten gleicher, für die gesamte Gebrauchsduer garantierter Zuverlässigkeit und Sicherheit. Die gewählte Lösung sollte also über Eigenschaften verfügen, die Instandhaltungsfragen überflüssig machen oder wenigstens mindern.

Erst dann, wenn solche Eigenschaften nicht oder nur unwirtschaftlich realisierbar sind, sollten bzw. müssen Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen getroffen werden. Grundsätzlich sind dann zu beachten:

- Schadensfreiheit bzw. Zuverlässigkeit fördern,
- Fehlermöglichkeiten bei Demontage, Remontage und Wiederinbetriebsetzung verhindern,
- Wartungsmöglichkeit erleichtern,
- Wartungsergebnisse kontrollierbar machen und
- Inspektionsmöglichkeiten erleichtern.

Normalerweise konzentrieren sich *Wartungsmaßnahmen* auf Nachfüllen, Schmieren, Kon servieren und Reinigen. Die Tätigkeiten müssen durch entsprechende ergonomisch richtige sowie physiologisch und psychologisch günstige Gestaltung und Markierung unterstützt werden. Beispiele sind gute Zugänglichkeit, nicht ermüdende Arbeitshaltung, deutliche Erkennbarkeit, verständliche Hinweise.

*Inspektionsmaßnahmen* können auf ein Mindestmaß reduziert werden, wenn die technische Lösung von sich aus der unmittelbaren Sicherheitstechnik folgt und so zugleich in der Auslegung eine hohe Zuverlässigkeit verspricht. Dabei sollen Überlastungen durch entsprechende Prinzipien oder Lösungen grundsätzlich vermieden werden, z. B. Anwendung des Prinzips der Selbsthilfe mit selbstschützenden Lösungen. Dazu gehört auch eine geringe Fehler- und Störgrößenanfälligkeit. Sind Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen nicht vermeidbar, so gelten nach van der Mooren (1991) Gestaltungsregeln, die in anderen Zusammenhängen ebenfalls Bedeutung haben und dort auch schon angesprochen wurden, so dass ihre Aufzählung und eine kurze Erläuterung genügen.

*Konstruktive Maßnahmen*, die schon auf prinzipieller Ebene zu beachten sind und den Wartungs- und Inspektionsaufwand verringern können:

- selbtausgleichende und selbnnachstellende Lösungen bevorzugen,
- einfache Konstruktion und wenige Teile anstreben,
- genormte Komponenten verwenden,
- Zugänglichkeit fördern,
- Zerlegbarkeit fördern,

- modulare Bauweise anwenden und
- wenige und gleiche Hilfsstoffe verwenden.

Dazu sind Wartungs-, Inspektions- und Instandsetzungsanweisungen auszuarbeiten, mitzuliefern und Wartungs- und Inspektionsstellen deutlich zu markieren. Hilfen dafür geben DIN 31052: Aufbau von Instandhaltungsanleitungen und DIN 31054: Festlegung von Zeiten und Aufbau von Zeitsystemen.

Zur Durchführung von Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen gelten ergonomisch orientiert folgende Regeln, die durch entsprechende konstruktive Gestaltung ebenfalls unterstützt werden müssen:

- Die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit von Wartungs-, Inspektions- und Instandsetzungsstellen muss möglich sein.
- Die Arbeitsumstände haben den sicherheitstechnischen und ergonomischen Bedingungen zu entsprechen.
- Die Wahrnehmbarkeit ist sicherzustellen.
- Die Durchschaubarkeit der funktionalen Vorgänge und die der Hilfs- und Unterstützungsmaßnahmen ist zu gewährleisten.
- Die Lokalisierbarkeit von evtl. Schadensstellen ist zu ermöglichen.
- Die Auswechselbarkeit (De- und Remontage) bei Instandsetzungsmaßnahmen ist in einfacher Weise zu schaffen.

In van der Mooren (1991) sind zu diesen Forderungen instruktive Beispiele angeführt.

Schließlich muss noch erwähnt werden, dass Instandhaltung in ein übergreifendes Konzept einzubetten ist, das hinsichtlich der Durchführung mit den Funktions- und Betriebsbedingungen harmonisiert sein muss und nicht zuletzt auch die Gesamtkosten, nämlich die Anschaffungskosten, die laufenden Betriebs- sowie Wartungs- und Inspektionskosten, berücksichtigt und dabei einem Optimum mit niedrigen Gesamtkosten zustrebt.

---

### **13.14 Recyclinggerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)**

#### **1. Zielsetzungen und Begriffe**

Zur Einsparung und Rückführung von Rohstoffen im Sinne eines umweltverträglichen Verhaltens kommen folgende Möglichkeiten in Betracht (Jorden 1983; Jorden 1984; Lindemann und Mörtl 2001; Meyer 1983; Nickel 1996; Pourshirazi 1987; VDI 2243 2000; VDI 2343 1999–2001; Weege 1981):

- *Verringelter Stoffeinsatz* durch bessere Materialausnutzung und weniger Abfall bei der Fertigung.
- *Substitution von Werkstoffen*, die aus knapp und damit teuer werdenden Rohstoffen hergestellt werden müssen, durch Werkstoffe auf der Grundlage billiger und länger verfügbarer Rohstoffe (Beitz 1990).
- *Recycling* durch Rückführung von Herstellungsabfällen, Produkten oder Teilen von Produkten zu deren erneuter Verwendung oder Verwertung.

Im Folgenden werden unter Verweis auf die VDI-Richtlinie 2243 (2000) zunächst die einsetzbaren Recyclingformen bzw. -prozesse erläutert, weil ohne deren Kenntnis ein Verständnis für Gestaltungsempfehlungen zur Recyclingunterstützung nicht möglich ist, s. Abb. 13.117:

*Produktionsabfallrecycling (Materialrecycling)* ist die Rückführung von Herstellungsabfällen in einen neuen Produktionsprozess, z. B. Stanzabfälle.

*Recycling während des Produktgebrauchs (Produktrecycling)* ist unter Beibehaltung der Produktform die Rückführung von gebrauchten Produkten oder Teilen eines Produkts in ein neues Gebrauchsstadium, z. B. Austauschmotoren.

*Altstoffrecycling (Materialrecycling)* ist die Rückführung von verbrauchten Produkten bzw. Altstoffen in einen neuen Produktionsprozess, z. B. Autoschrott in neue Werkstoffe.

Solche Sekundärwerkstoffe oder -teile sollten in ihrer Qualität den Neuwerkstoffen oder -teilen nicht nachstehen (Wiederverwertung), bei starkem Abfall der Qualität kommt aber nur eine Weiterverwertung in Frage.

Alle genannten Rückführungen können durch einen Aufarbeitungs- bzw. Aufbereitungsprozess unterstützt werden. Der das Recyclingsystem verlassende Stofffluss endet in der Deponie bzw. Biosphäre. Diese wiederum können aber in der Zukunft evtl. als Ressourcen genutzt werden.

Innerhalb der Recyclingkreisläufe sind, ebenfalls nach Abb. 13.117, verschiedene Recyclingformen möglich. Grundsätzlich kann zwischen einer erneuten *Verwendung* und einer *Verwertung* von Produkten unterschieden werden.

Die *Verwendung* ist durch die (weitgehende) Beibehaltung der Produktform gekennzeichnet. Diese Recyclingart findet also auf hohem Wertniveau statt und ist deshalb anzustreben. Je nachdem, ob bei der erneuten Verwendung ein Produkt die gleiche oder eine veränderte Funktion erfüllt, unterscheidet man zwischen Wiederverwendung (z. B. Gasflaschen) und Weiterverwendung (z. B. Autoreifen als Fender).

Die *Verwertung* löst die Produktform auf, was zunächst mit einem größeren Wertverlust verbunden ist. Je nachdem, ob bei der Verwertung eine gleichartige oder geänderte Herstellung durchlaufen wird, unterscheidet man zwischen Wiederverwertung (z. B. geschredderter Autoschrott) und Weiterverwertung (z. B. Altkunststoffe zu Öl durch Pyrolyse).

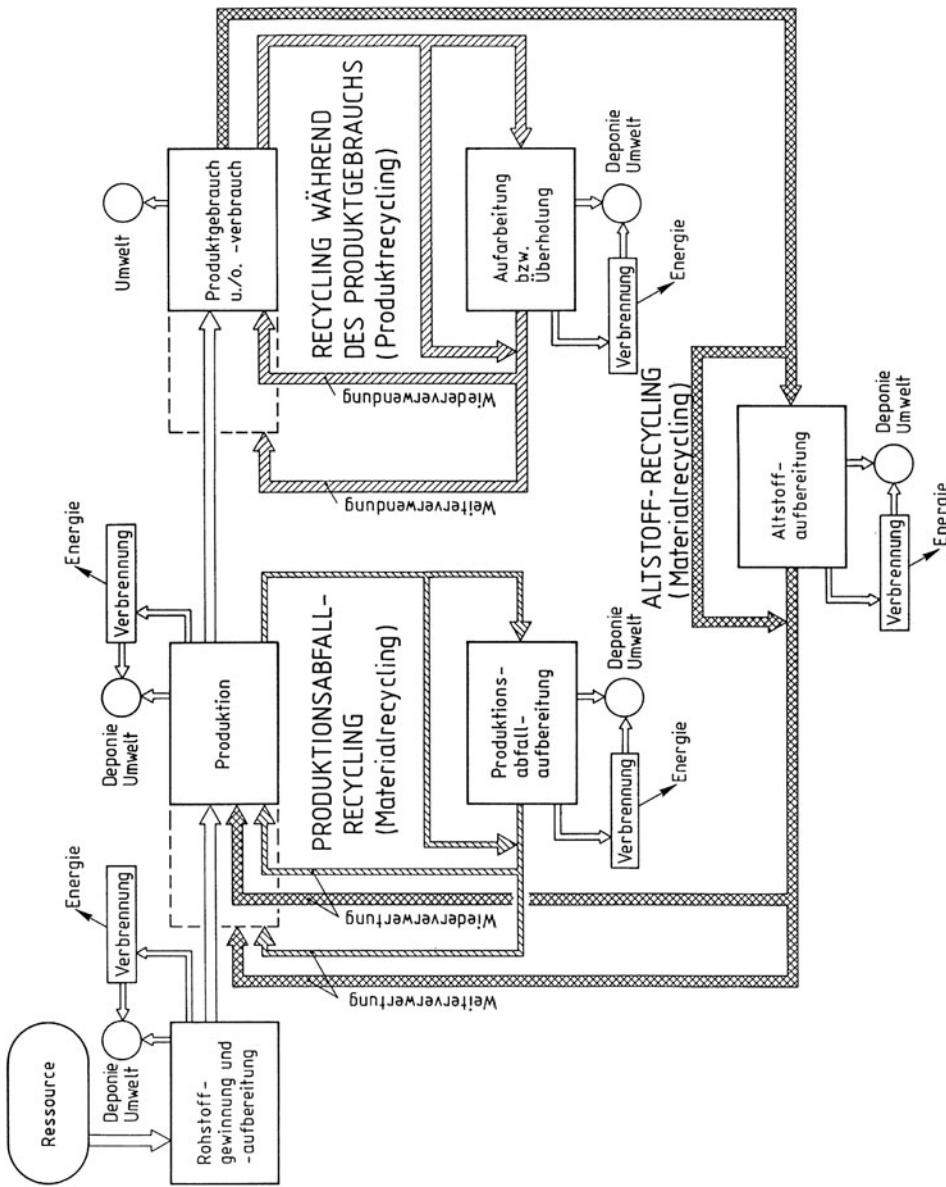


Abb. 13.117 Recyclingmöglichkeiten. (Nach Meyer 1983; VDI 2243 2000)

## 2. Recyclinggerechte Gestaltung

Zur Unterstützung der angeführten Aufbereitungs- und Aufarbeitungsverfahren bzw. direkt einsetzbarer Verwertungsverfahren können bereits bei der Produktentwicklung Maßnahmen vorgesehen werden (Beitz und Meyer 1981; Beitz und Pourshirazi 1985; Beitz und Wende 1991; Brinkmann et al. 1994; Jorden 1983; Jorden 1984; Meyer 1983; Meyer und Beitz 1982; Neumann 1996; VDI 2243 2000; Weber 1990; Weege 1981; Wende 1994). Diese müssen aber mit den anderen zu beachtenden Zielsetzungen und Bedingungen der Aufgabe verträglich sein. Insbesondere muss die Wirtschaftlichkeit der Herstellung und des Produktgebrauchs gewährleistet bleiben.

*Recyclingorientierung beim Konstruktionsprozess* Bei Berücksichtigung von Recyclinggesichtspunkten sind für die einzelnen Schritte bzw. Phasen des Konstruktionsprozesses recyclingbezogene Aufgaben zu erfüllen. Abbildung 13.118 zeigt solche Aufgaben, die den Arbeitsabschnitten der VDI 2221 (Suhr 1996; Wende 1994) zugeordnet sind.

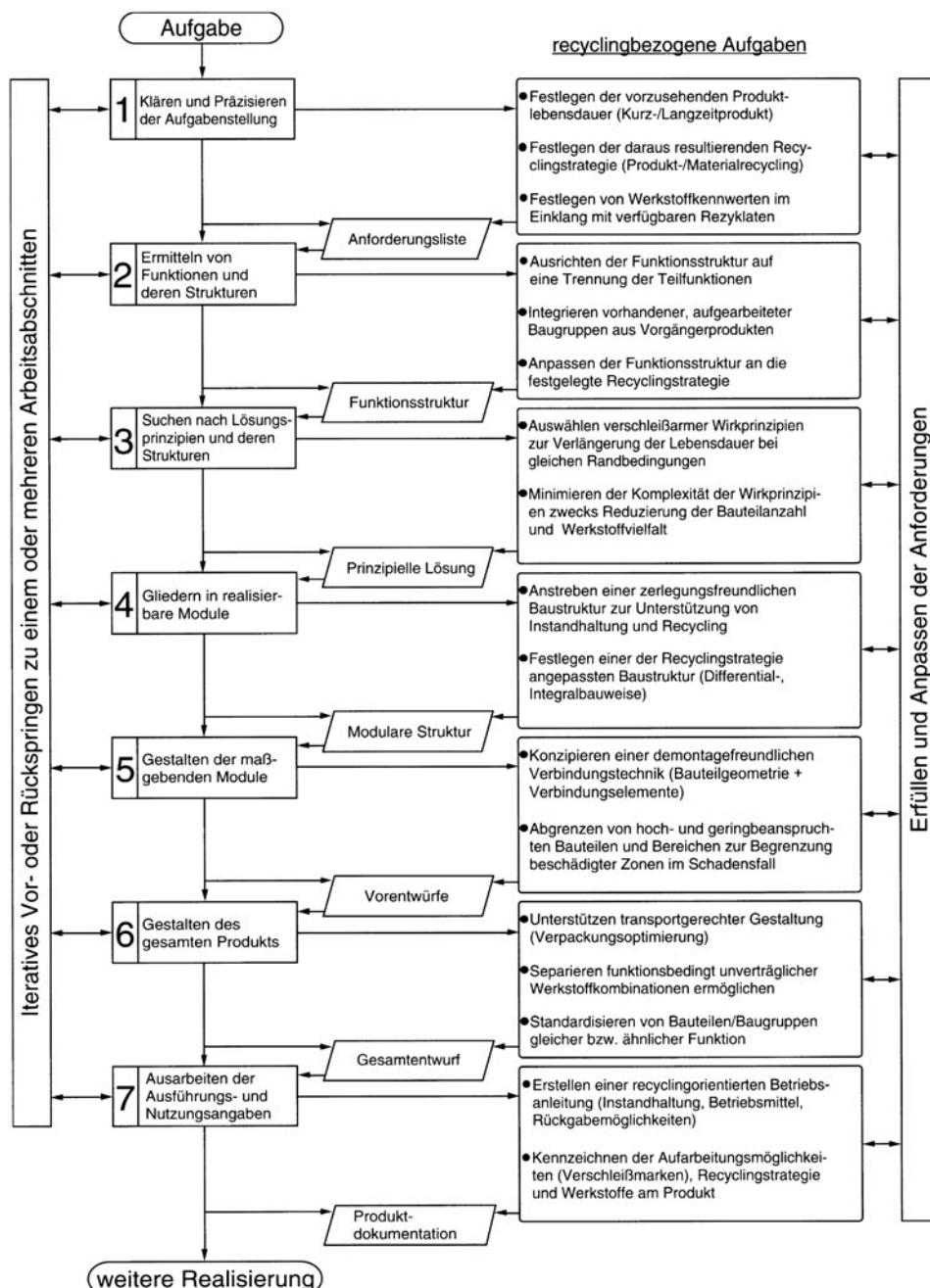
*Richtlinien zur aufbereitungsfreundlichen Produktgestaltung* Die folgenden Richtlinien können sich auf ein Gesamtpunkt oder nur auf einzelne Baugruppen beziehen. Sie sind einzeln oder in Kombination anwendbar und dienen der Verbesserung einer Aufbereitung oder unmittelbar einer Verwertung.

*Werkstoffverträglichkeit* Da sich verwertungsfreundliche Einstoffprodukte nur selten verwirklichen lassen, sind solche Werkstoffkombinationen als untrennbare Einheit anzustreben, die bei einer Verwertung untereinander verträglich sind und sich dadurch wirtschaftlich und mit hoher Qualität verwerten lassen.

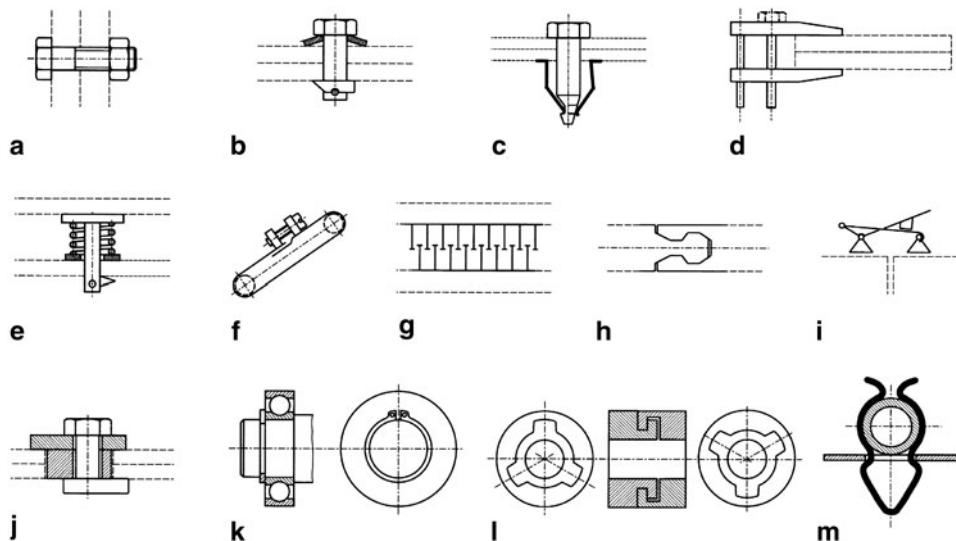
Zur Erfüllung dieser Zielsetzung müssen die verfahrenstechnischen Anforderungen eines Verwertungsverfahrens bekannt sein. Hilfreich erscheint hierzu die Definition von sog. *Altstoffgruppen* oder *Matrixwerkstoffen*, denen jeweils verträgliche Werkstoffe zugeordnet sind. Bis solche Altstoffgruppen von der Werkstoffwissenschaft und Hüttenindustrie in allgemein anwendbarer Form festgelegt sind, muss die Werkstoffverträglichkeit im Einzelfall zwischen Konstrukteur und entsprechenden Fachleuten geklärt werden. Das lohnt sich insbesondere für Serienprodukte mit entsprechender Recyclingbedeutung.

*Werkstofftrennung* Lässt sich eine Werkstoffverträglichkeit für untrennbare Teile und Gruppen eines Produkts nicht erreichen, kann durch zusätzliche Fügestellen im Zuge einer Aufbereitung, z. B. durch Demontage, eine Trennung der unverträglichen Werkstoffe ermöglicht werden.

*Aufbereitungsgerechte Fügestellen* Fügestellen, die einer qualitativ besseren und wirtschaftlichen Aufbereitung dienen, sollen leicht demontierbar, gut zugänglich und möglichst an den äußeren Produktzonen angeordnet werden. Prinzipien für demontagefreundliche Verbindungen zeigt Abb. 13.119. Verbundkonstruktionen erfordern generell einen höheren Recyclingaufwand (Grote et al. 1997) und sollten vermieden werden.



**Abb. 13.118** Recyclingbezogene Aufgaben beim Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, zugeordnet zu dem Ablauf (nach Suhr 1996; VDI 2221 1993; Wende 1994)



**Abb. 13.119** Demontagefreundliche, lösbare Verbindungen (Nickel 1996; Schmidt-Kretschmer 1994). **a** Schraube, **b** 1/4 Drehverschluss, **c** Druck-Dreh-Verschluss, **d** Klemme, **e** Druck-Druck-Verschluss, **f** Band mit Schloss, **g** Klettverschluss, **h** formschlüssige Schnappverbindung, **i** Spannverschluss, **j** Exzenterverschluss, **k** Sicherungsring, **l** Bajonettverschluss, **m** Schnappverbindungen

Zur *wirtschaftlichen Demontage* vor den eigentlichen zerkleinernden und kompaktierenden Aufbereitungsverfahren Einsatz einfacher Werkzeuge, automatischer Anlagen und/oder ungelernten Personals ermöglichen. Letzteres gilt insbesondere für die Demontage auf Schrottplätzen.

**Hochwertige Werkstoffe** Wertvolle und knappe Werkstoffe sind besonders gut zerlegungsgerecht anzutragen und zu kennzeichnen.

**Gefährliche Stoffe** Stoffe, die bei einer Aufbereitung oder unmittelbaren Verwertung eine Gefahr für Mensch, Anlage und Umgebung darstellen, sind in jedem Fall abtrennbar bzw. entleerbar anzutragen.

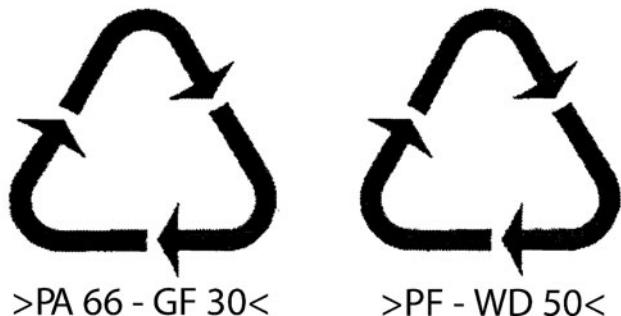
**Richtlinien zur aufarbeitungsfreundlichen Produktgestaltung** Demontage einfach und weitgehend zerstörungsfrei ermöglichen. Abbildung 13.120 zeigt Gestaltungsrichtlinien für demontagegerechte Verbindungszonen. Weitere Hinweise zur demontagegerechten Gestaltung sind in Hentschel (1996); Kriwet (1994); Neubert und Martin (1997); Suhr (1996) zu finden.

**Reinigung** für alle wiederverwendbaren Teile leicht und ohne Beschädigung sicherstellen.  
**Prüfung/Sortierung** durch Gestaltung der Teile und Gruppen erleichtern.

Gestaltungsrichtlinien	nicht demontagerecht	demontagegerecht
<b>Demontagegerechte Baustruktur</b>		
- Gliedern in Demontagebaugruppen, deren Teile bzw. Werkstoffe verwertungsverträglich sind		
- Zuordnen des Basisteils einer Demontagebaugruppe zu einer verwertungsgünstigen Altstoffgruppe		
- Vermeiden von unlösbarer Verbundkonstruktionen mit verwertungsunverträglichen Werkstoffen		
- Verringern von Fügestellen		
<b>Demontagegerechte Fügestellen</b>		
- Verwenden leicht demontierbarer oder zerstörbarer Verbindungs- und Sicherungselemente, auch nach längerer Nutzungsdauer		
- Verringern der Verbindungselemente		
- Verwenden gleicher Verbindungselemente		
- Gewährleisten guter Zugänglichkeit für Demontagewerzeuge		
- Bevorzugen einfacher Standardwerkzeuge		
- Vermeiden langer Demontagewege		

**Abb. 13.120** Gestaltungsrichtlinien für demontagegerechte Produkte (Nickel 1996; Schmidt-Kretschmer 1994)

**Abb. 13.121** Beispiel einer Kennzeichnung von Kunststoffbauteilen (nach DIN ISO 11469, DIN 7728T.1 und DIN ISO 1043)



*Teilenachbearbeitung bzw. Beschichtungen* durch Materialzugaben sowie Spann-, Mess- und Justierhilfen ermöglichen.

Wiedermontage mit Werkzeugen der Einzel- und Kleinserienfertigung einfach durchführbar machen.

Zur Minderung des Neuteilaufwandes sind folgende Maßnahmen hilfreich:

*Verschleiß* auf speziell dafür vorgesehene, leicht nachstellbare bzw. austauschbare Elemente beschränken.

*Verschleißzustand* möglichst leicht und eindeutig erkennbar machen, um Abnutzungsvorrat bzw. Wiederverwendbarkeit beurteilen zu können.

*Beschichtungen* an Verschleißstellen durch geeignete Grundwerkstoffe erleichtern.

*Korrosion* durch Gestaltungs- und Schutzmaßnahmen minimieren, da sie die Wiederverwendbarkeit von Teilen und Produkten stark herabsetzt.

*Lösbare Verbindungen* für die gesamte Produkt-Nutzungsdauer funktionsfähig auslegen. Festkorrodieren unterbinden, aber auch einen Verlust der Haltefähigkeit nach wiederholtem Lösen vermeiden (Schmidt-Kretschmer und Beitz 1991; VDI 493).

*Kennzeichnung von Recyclingeigenschaften* Entsprechend der vom Konstrukteur vorgesehenen Recyclingstrategie und der dafür entwickelten Produktgestaltung sind Baugruppen und Bauteile eines Produkts hinsichtlich ihrer Recyclingeigenschaften und der erforderlichen Recyclingverfahren dauerhaft zu kennzeichnen. Dadurch können die erforderlichen Folgeprozesse und Maßnahmen schneller und sicherer ausgewählt werden. Ein Beispiel zur Kennzeichnung von Kunststoffbauteilen zeigt Abb. 13.121.

### 13.15 Risikogerecht (Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz<sup>†</sup>, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Trotz intensiver Fehler- und Störgrößenbeseitigung werden Informationslücken und Beurteilungsunsicherheiten verbleiben. Aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen ist es nicht immer möglich, sie mit Hilfe theoretischer oder experimenteller Untersuchungen

auszuräumen. Oft gelingt nur eine Eingrenzung. Obwohl sorgfältig entwickelt wurde, kann ein Rest von Unsicherheit bleiben, ob unter den in der Anforderungsliste festgelegten Bedingungen die gewählte Lösung ihre Funktion stets und überall voll erfüllen wird oder ob bei der sich schnell verändernden Marktlage die wirtschaftlichen Voraussetzungen gültig bleiben. Es verbleibt ein gewisses Risiko.

Man könnte versucht sein, stets so zu konstruieren, dass man von einer möglichen Grenze recht weit entfernt bleibt und so das Risiko sich einstellender Funktionseinschränkung oder frühzeitig auftretender Schäden umgeht, indem man mit entsprechend geringer Ausnutzung ein Risiko z. B. hinsichtlich Lebensdauer oder Verschleißrate, ausschließt. Der Praktiker weiß, dass er mit einer solchen Einstellung sehr rasch einem anderen Risiko zusteckt: Die gewählte Lösung wird zu groß, zu schwer oder zu teuer und kann auf dem Markt nicht mehr konkurrieren. Dem technischen Risiko steht das wirtschaftliche gegenüber.

**Risikobegegnung** Angesichts einer solchen nicht zu umgehenden Situation stellt sich die Frage, welche Hilfen nun noch benutzt werden können, wenn die Lösung sorgfältig erarbeitet war und die einschlägigen Hinweise aufmerksam beachtet wurden. Der wesentliche Gesichtspunkt ist, dass der Konstrukteur aufgrund und nach der Fehler-, Störgrößen- und auch Schwachstellenanalyse mittels *Ersatzlösungen* für den Fall vorsorgt, dass die realisierte Lösung in einem mit Unsicherheiten behafteten Punkt nicht befriedigen sollte.

Bei der methodischen Lösungssuche sind eine Reihe von Lösungsvarianten erarbeitet und untersucht worden. Dabei wurden Vor- und Nachteile einzelner Lösungen diskutiert und gegeneinander abgewogen: Dieser Vergleich hat u. U. verbesserte neue Lösungen bewirkt. Man kennt also die Palette der Möglichkeiten und hat Rangfolgen erarbeitet, die auch die wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigen.

Grundsätzlich wird man dabei der wirtschaftlicheren, d. h. weniger aufwändigen Lösung bei ausreichender technischer Funktion den Vorrang geben, weil sie bei der ausreichenden, aber möglicherweise „risikoreicheren“ Funktionserfüllung einen größeren wirtschaftlichen Spielraum lässt. Die Chancen, die neue Lösung auf den Markt zu bringen und damit auch ihre Bewährung zu beurteilen, sind höher als der umgekehrte Weg, der bei zu hohen Kosten die Realisierung überhaupt in Frage stellt oder aber wegen der „risikolosen“ Auslegung Erfahrungen über bestehende Grenzen nicht zu bieten vermag. Mit einer solchen Strategie soll aber eine im sicherheitstechnischen Sinne leichtsinnige oder risikoreiche Ausführung keinesfalls bevorzugt werden, die dem Anwender Schaden und Ausfälle verursachen würde.

Sind Fragen also offen geblieben, die hinsichtlich eines die Funktion einschränkenden, die Sicherheit aber nicht berührenden Risikos mit theoretischer Behandlung oder gezielten Versuchen in angemessener Zeit oder mit vertretbarem Aufwand nicht beantwortet werden können, wird man sich zu der risikobehafteten Lösung entschließen müssen und dabei eine kostenaufwändigere, risikoärmere Lösung für den Bedarfsfall vorbereiten.

Aus den in der Konzept- und Entwurfsphase erarbeiteten Lösungsvorschlägen, die das betreffende Risiko mit allerdings größerem Aufwand einschränken oder vermeiden, wird eine Zweit- oder Drittlösung entwickelt, die auf möglichst kleine Gestaltungszonen beschränkt bleibt und ggf. bereitsteht. Dies geschieht so, dass in der ausgewählten Lösung solche Maßnahmen *bewusst vorgeplant* werden. Tritt dann der Fall ein, dass das Ergebnis

nicht den Erwartungen entspricht, kann mit Mehraufwand ggf. schrittweise der Mangel behoben werden, ohne dass größere Aufwendungen an Zeit und Geld nötig sind.

Ein solch geplantes Vorgehen kann nicht nur dazu dienen, Risiken mit erträglichem Aufwand einzuschränken, sondern auch in vorteilhafter Weise nach und nach Neuerungen einzuführen und deren Anwendungsgrenzen gezielt zu erfahren, damit Weiterentwicklungen mit weniger Risiko, d. h. auch in wirtschaftlich abgewogener Weise, durchgeführt werden können. Dieses Vorgehen muss selbstverständlich eine geplante Verfolgung solcher Betriebserfahrungen einschließen.

Unter *risikogerecht* sollen also technisches und wirtschaftliches Risiko in Einklang gebracht und einerseits einen für den Hersteller nützlichen Gewinn an Erfahrung, andererseits für den Anwender ein zuverlässiger, schadensfreier Betrieb sichergestellt werden.

---

### 13.16 Bewertung von Entwürfen (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Eine Bewertung kann nur gegenüber einem Zielsystem erfolgen. Wie für die Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit müssen also zu Beginn eines Projekts auch die Entwurfsziele festgelegt werden. Die Problematik dabei ist die heute meistens geringe Fertigungstiefe und hohe Arbeitsteilung in Unternehmen. Der Anteil an selbst entwickelten und konstruierten Bauteilen und Komponenten für ein Produkt ist relativ gering. Die hohe Arbeitsteilung im Unternehmen erfordert einen gezielten und geregelten Informationsaustausch zwischen den Beteiligten.

Bei der Beurteilung von Entwürfen stehen deshalb, neben den Kostenaspekten, insbesondere solche der Integration der Eigen- und Fremdkomponenten im Fokus. Das Managen und Beurteilen der Komponentenschmittstellen insbesondere innerhalb des Produkts bestimmt damit wesentlich die Güte eines Entwurfs. Da der überwiegende Teil der heutigen Produkte mechatronische Produkte sind, also Mechanik, Elektrik und Elektronik sowie Software funktional vereinigen, wird eine Beurteilung besonders erschwert. Als grobe Anhaltspunkte für die Güte eines Entwurfs können die im Folgenden aufgeführten Kriterien dienen:

- Sind die Anforderungen der Anforderungsliste erfüllt, insbesondere funktionale, Bauraum- und Leistungsanforderungen?
- Werden die geltenden, marktspezifischen Gesetze und Vorschriften eingehalten?
- Sind alle Bauteile und Komponenten des Produkts in den Ebenen Mechanik, Elektrik/Elektronik (z. B. Fragen der elektromagnetischen Verträglichkeit) und Software integrierbar?
- Werden die Kostenziele erreicht?

Diese Kriterien müssen im konkreten Fall ergänzt und detailliert werden.

## Literatur

### Abschnitt 13.1

- Bertsche B, Lechner G (1999) Zuverlässigkeit im Maschinenbau, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Biezeno CB, Grammet R (1953) Technische Dynamik, Bd. 1 und 2, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Gassner E (1984) Ermittlung von Betriebsfestigkeitskennwerten auf der Basis der reduzierten Bauteil-Dauerfestigkeit. Materialprüfung 26(11):394–398
- Gnilke W (1980) Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente. C. Hanser, München
- Haibach E (1989) Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Klotter K (1981) Technische Schwingungslehre, Bd. 1 Teil A und B, 3. Aufl. Springer, Berlin (1980/1981)
- Köhler G, Rögnitz H (1981) Maschinenteile, Bd. 1 u. Bd. 2, 6. Aufl. Teubner, Stuttgart
- Leipholz H (1969) Festigkeitslehre für den Konstrukteur. Konstruktionsbücher Bd. 25. Springer, Berlin
- Magnus K (1976) Schwingungen, 3. Aufl. Teubner, Stuttgart
- Munz D, Schwalbe K, Mayr P (1971) Dauerschwingverhalten metallischer Werkstoffe. Vieweg, Braunschweig
- Neuber H (1985) Kerbspannungslehre, 3. Aufl. Springer, Berlin
- Niemann G (2001) Maschinenelemente, Bd. 1. Springer, Berlin (1963, 2. Aufl.; 1975, 3. Aufl.)
- Pflüger A (1964) Stabilitätsprobleme der Elastostatik. Springer, Berlin
- Schott G (1983) Ermüdungsfestigkeit – Lebensdauerberechnung für Kollektiv- und Zufallsbeanspruchungen. VEB, Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig
- Tauscher H (1982) Dauerfestigkeit von Stahl und Gußeisen. VEB Verlag, Leipzig
- ten Bosch M (1972) Berechnung der Maschinenelemente. Reprint. Springer, Berlin
- TGL 19340 (1984) Dauerfestigkeit der Maschinenteile. DDR-Standards. Berlin
- VDI-Berichte Nr. 129 (1968) Kerbprobleme. VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI-Richtlinie 2226 (1965) Empfehlung für die Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI-Richtlinie 2227 (Entwurf) (1974) Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung, Zeit- und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen (mit ausführlichem Schrifttum). VDI-Verlag, Düsseldorf
- Zienkiewicz OG (1984) Methode der finiten Elemente, 2. Aufl. Hanser, München

### Abschnitt 13.2

- Beitz W (1969) Moderne Konstruktionstechnik im Elektromaschinenbau. Konstruktion 21:461–468
- Endres W (1958) Wärmespannungen beim Aufheizen dickwandiger Hohlzylinder. Brown Boveri Mitt 45:21–28
- Lambrecht D, Scherl W (1963) Überblick über den Aufbau moderner wasserstoffgekühlter Generatoren. Verlag AEG, Berlin, S 181–191
- Melan E, Parkus H (1953) Wärmespannungen infolge stationärer Temperaturfelder. Springer, Wien
- N.N. (1958) Nickelhaltige Werkstoffe mit besonderer Wärmeausdehnung. Nickel-Berichte D 16:79–83
- N.N. (1964) Mahle-Kolbenkunde, 2. Aufl. Stuttgart
- Pahl G (1963) Konstruktionstechnik im thermischen Maschinenbau. Konstruktion 15:91–98

- Pahl G (1973d) Ausdehnungsgerecht. Konstruktion 25:367–373
- Salm M, Endres W (1958) Anfahren und Laständerung von Dampfturbinen. Brown Boveri Mitt 45(7/8):339–347
- Wanke K (1963) Wassergekühlte Turbogeneratoren. In „AEG-Dampfturbinen, Turbogeneratoren“. Verlag AEG, Berlin, S 159–168

### Abschnitt 13.3

- Beelich KH (1973) Kriech- und relaxationsgerecht. Konstruktion 25:415–421
- Erker A, Mayer K (1973) Relaxations- und Sprödbruchverhalten von warmfesten Schraubenverbindungen. VGB Kraftwerkstechnik 53:121–131
- Florin C, Imgrund H (1970) Über die Grundlagen der Warmfestigkeit. Arch Eisenhüttenwesen 41:777–778
- Hüskes H, Schmidt W (1972) Unterschiede im Kriechverhalten bei Raumtemperatur von Stählen mit und ohne ausgeprägter Streckgrenze. DEW-Techn Berichte 12:29–34
- Keil E, Müller EO, Bettziehe P (1971) Zeitabhängigkeit der Festigkeits- und Verformbarkeitswerte von Stählen im Temperaturbereich unter 400°C. Eisenhüttenwesen 43:757–762
- Knappe W (1969) Thermische Eigenschaften von Kunststoffen. VDI-Z 111:746–752
- Menges G, Taprogge R (1970) Denken in Verformungen erleichtert das Dimensionieren von Kunststoffteilen. VDI-Z 112:341–346, 627–629
- Müller K (1966) Schrauben aus thermoplastischen Kunststoffen. Kunststoffe 56:241–250, 422–429
- Müller K (1970) Schrauben aus thermoplastischen Kunststoffen. Werkstattblatt 514 und 515. Hanser, München
- N.N. (1969) Ergebnisse deutscher Zeitstandversuche langer Dauer. Stahleisen, Düsseldorf
- Pahl G (1963) Konstruktionstechnik im thermischen Maschinenbau. Konstruktion 15:91–98
- Steinack K, Veenhoff F (1960) Die Entwicklung der Hochtemperaturturbinen der AEG. AEG-Mitt SO 433–453
- Wiegand H, Beelich KH (1968a) Einfluss überlagerter Schwingungsbeanspruchung auf das Verhalten von Schraubenverbindungen bei hohen Temperaturen. Draht Welt 54:566–570
- Wiegand H, Beelich KH (1968b) Relaxation bei statischer Beanspruchung von Schraubenverbindungen. Draht Welt 54:306–322

### Abschnitt 13.4

- DIN 50900 Teil 1: Korrosion der Metalle. Allgemeine Begriffe. Beuth, Berlin
- DIN 50900 Teil 2: Korrosion der Metalle. Elektrochemische Begriffe. Beuth, Berlin
- DIN 50960: Korrosionsschutz, galvanische Überzüge. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 8044: Korrosion von Metallen und Legierungen, Grundbegriffe und Definitionen. Beuth, Berlin
- Pahl G (1973b) Prinzip der Aufgabenteilung. Konstruktion 25:191–196
- Pahl G (1981) Konstruktionsmethodik als Hilfsmittel zum Erkennen von Korrosionsgefahren. 12. Konstr.-Symposium Dechema, Frankfurt a. M.
- Rubo E (1966) Der chemische Angriff auf Werkstoffe aus der Sicht des Konstrukteurs. Der Maschinenschaden 65–74
- Rubo E (1985) Kostengünstiger Gebrauch ungeschützter korrosionsanfälliger Metalle bei korrosivem Angriff. Konstruktion 37:11–20

- Schraft RD (1982) Montagegerechte Konstruktion –die Voraussetzung für eine erfolgreiche Automatisierung. Proc. of the 3rd. Int. Conf. an Assembly Automation in Böblingen, S 165–176
- Spähn H, Fäßler K (1966) Kontaktkorrosion. Grundlagen – Auswirkung – Verhütung. Werkst Korros 17:321–331
- Spähn H, Fäßler K (1972) Zur konstruktiven Gestaltung korrosionsbeanspruchter Apparate in der chemischen Industrie. Konstruktion 24:249–258, 321–325
- Wiegand H, Kloos K-H, Thomala W (2007) Schraubenverbindungen. Springer, Berlin

## Abschnitt 13.5

- Czichos H, Habig K-H (1992) Tribologie Handbuch – Reibung und Verschleiß. Vieweg, Braunschweig
- DIN 50320: Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth, Berlin
- Habig K-H (1980) Verschleiß und Härte von Werkstoffen. C. Hanser, München
- Kloos KH (1973) Werkstoffoberfläche und Verschleißverhalten in Fertigung und konstruktive Anwendung. VDI-Berichte Nr 194. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Simon H, Thoma M (1985) Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe. C. Hanser, München
- Wahl W (1975) Abrasive Verschleißschäden und ihre Verminderung. VDI-Berichte Nr 243, „Methodik der Schadensuntersuchung“. VDI-Verlag, Düsseldorf

## Abschnitt 13.6

- Bode E (1996) Konstruktionsatlas: Werkstoffgerechtes Konstruieren, verfahrensgerechtes Konstruieren; mit 1200 Konstruktionsbeispielen, 6. Aufl. Vieweg, Braunschweig
- Buchfink G (2006) Faszination Blech: Ein Material mit grenzenlosen Möglichkeiten, 2. Aufl. Vogel, Würzburg
- Buchfink G (2008) Werkzeug Laser: Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung, 2. Aufl. Vogel, Würzburg
- Dilthey U (2006) Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien, 3. Aufl. Springer, Heidelberg
- DIN8580 (2003) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren, 3. Aufl. Beuth, Berlin
- DIN8584 (2003) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Zugdruckumformung, 2. Aufl. Beuth, Berlin
- DIN8587 (2003) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Schubumformung, 2. Aufl. Beuth, Berlin
- DIN8588 (2003) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Zerteilen, 2. Aufl. Beuth, Berlin
- DIN8593 (2003) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren Fügen, 3. Aufl. Beuth, Berlin
- DINEN10130 (2006) DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen. Beuth, Berlin
- Fischer U (2002) Tabellenbuch Metall, Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe, 42. Aufl. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan Gruiten

- Grote K, Feldhusen J, Dubbel H (2007) Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Aufl. Springer, Berlin
- Klein B (2012) Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 9. Aufl. Vieweg + Teubner Verlag Springer – Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden
- Klocke F (2006) Fertigungsverfahren 4: Umformen, 5. Aufl. Springer, Berlin
- Klocke F (2007) Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung, 4. Aufl. Springer, Berlin
- Reisgen U (2010) Fügetechnik I: Grundlagen. Institut für Schweißtechnische Fügeverfahren der RWTH Aachen, Aachen
- Schuler GmbH (1996) Handbuch der Umformtechnik. Springer, Berlin
- Trumpf (2003) N.N.: Gestalten von Teilen mit dem Werkstoff Blech: Zusammenfassung weiterer Themen – Workshop. Trumpf, Ditzingen
- Trumpf (2006) N.N.: Stanzbearbeitung: Technologie, Werkzeuge, Praxis. Technische Information. Trumpf, Ditzingen
- Trumpf (2007a) N.N.: Technologie des Biegens. Technische Information. Trumpf, Ditzingen
- Trumpf (2007b) N.N.: Blech 1009–1. Konstruktionsrichtlinie. Trumpf, Ditzingen
- Trumpf (2007c) N.N.: Laserbearbeitung: Festkörperlaser. Technische Information. Trumpf, Ditzingen
- Trumpf (2009) N.N.: Gestalten von Teilen mit dem Werkstoff Blech: Zusammenfassung – Workshop. Trumpf, Ditzingen
- Trumpf Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG (2011) Bilddatenbank. Trumpf, Ditzingen

## Abschnitt 13.7

- Flemming M, Ziegmann G, Roth S (1998) Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer, Berlin
- Helms O (2006, Dezember) Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. Dissertation, Technische Universität Dresden
- Hufenbach W, Kroll L, Helms O (2005a) Faserverbundgerechte Lasteinleitungen für Hochleistungszugstäbe. Konstruktion 7/8:61–63
- Hufenbach W, Kroll L, Gude M, Helms O, Ulbicht A, Grothaus R (2005b, Oktober) Integrative Rohrgewinde in Wickeltechnik für hochbeanspruchte Verbindungen bei Leichtbaustrukturen. Tagungsband: Schraubenverbindungen – Berechnung, Gestaltung, Anwendung. VDI-Fachtagung, Dresden, 5/6
- Hufenbach W, Helms O, Werner J (2007, Oktober) Welle-Nabe-Verbindungen für hochbeanspruchte Antriebskomponenten in Faserverbund-Leichtbauweise. VDI-Berichte Nr 2004: Welle-Nabe-Verbindungen. VDI-Fachtagung, Wiesloch, 24/25
- Hufenbach W, Helms O, Wohlfahrt D, Ritschel T (2009, März) Novel lightweight solutions for highly loaded power transmission components. Proceedings: SAMPE Europe International Conference, Paris.
- Hufenbach W (Hrsg) (2008) Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. progressmedia Verlag und Werbeagentur GmbH, Dresden
- Hufenbach W, Modler N, Krahl M (u. a.) (2010) Leichtbausitzschalen im Serientakt – Integrales Bauweisenkonzept. Kunststoffe, München Band. 100(5):56–59

- Koch I (2010, Dezember) Modellierung des Ermüdungsverhaltens textilverstärkter Kunststoffe. Dissertation, Technische Universität Dresden
- Schürmann H (2005) Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer, Berlin

## Abschnitt 13.8

- Bildschirmarbeitsverordnung – BildscharbV, vom 4.12. 1996 Bundesgesetzblatt BGBl. I, Seite 1841
- Böcker W (1981) Künstliche Beleuchtung: ergonomisch und energiesparend. Campus, Frankfurt/M
- Bullinger H.-J., Solf JJ (1979) Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung. 1. Systematik; 2. Handgeführte Werkzeuge, Fallstudien; 3. Stehteile an Werkzeugmaschinen, Fallstudien. Wirtschaftsverl. NW, Bremerhaven
- Dietz P, Gummersbach F (2000) Lärmarm konstruieren. XVIII. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Wirtschaftsverlag NW, Dortmund
- DIN 43790 (1991) Grundregeln für die Gestaltung von Strichskalen und Zeigern. Beuth, Berlin
- DIN 4543-1 (1994) Büroarbeitsplätze – Teil 1: Flächen für die Aufstellung und Benutzung von Büromöbeln; Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung. Beuth, Berlin
- DIN 5034 Tageslicht in Innenräumen. Teil 1 (2011) Allgemeine Anforderungen. Teil 2 (1985) Grundlagen. Teil 3 (2007) Berechnungen. Teil 4 (1994) Vereinfachte Bestimmung von Mindestfenstergrößen für Wohnräume. Teil 5 (2010) Messung. Teil 6 (2007) Vereinfachte Bestimmung zweckmäßiger Abmessungen von Oberlichtöffnungen in Dachflächen. Beuth, Berlin
- DIN 5035 Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht. Teil 3 (2006) Beleuchtung im Gesundheitswesen. Teil 6 (2006) Messung und Bewertung. Teil 7 (2004) Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen. Teil 8 (2007) Arbeitsplatzleuchten – Anforderungen, Empfehlungen und Prüfung. Beuth, Berlin
- DIN 5040 Leuchten für Beleuchtungszwecke. Teil 1 (1976) Lichttechnische Merkmale und Einteilung. Teil 2 (1995) Innenleuchten, Begriffe, Einteilung. Teil 3 (1977) Außenleuchten, Begriffe, Einteilung. Teil 4 (1999) Beleuchtungsscheinwerfer, Begriffe und lichttechnische Bewertungsgrößen. Beuth, Berlin
- DIN 33402 Körpermaße des Menschen. Teil 1 (2008) Begriffe, Messverfahren. Teil 2 (2005) Werte (Berichtigung 2007). Beiblatt 1 (2006) Anwendung von Körpermaßen in der Praxis. Teil 3 (1984) Bewegungsraum bei verschiedenen Grundstellungen und Bewegungen. Beuth, Berlin
- DIN 33403 Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung. Teil 2 (2000) Einfluss des Klimas auf den Wärmehaushalt des Menschen. Teil 3 (2011) Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße. Teil 5 (1997) Ergonomische Gestaltung von Kältearbeitsplätzen. Beuth, Berlin
- DIN 33404-3 (1982) Gefahrensignale für Arbeitsstätten; Akustische Gefahrensignale; Einheitliches Notsignal; Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung. Beuth, Berlin
- DIN 33408-1 (2008) Körperumrissabzüge – Seitenansicht für Sitzplätze. Beuth, Berlin
- DIN 33411 Körperkräfte des Menschen. Teil 1 (1982) Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen. Teil 3 (1986) Maximal erreichbare statische Aktionsmomente männlicher Arbeitspersonen an Handrädern. Teil 4 (1987) Maximale statische Aktionskräfte (Isodynamen). Teil 5 (1999) Maximale statische Aktionskräfte, Werte. Beuth, Berlin

- DIN 33414-4 (1990) Ergonomische Gestaltung von Warten; Gliederungsschema, Anordnungsprinzipien. Beuth, Berlin
- DIN EN 458 (2005) Gehörschützer – Empfehlungen für Auswahl, Einsatz, Pflege und Instandhaltung – Leitfaden. Beuth, Berlin
- DIN EN 894-3 (2010) Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile. Beuth, Berlin
- DIN EN 1005-3 (2009) Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung. Beuth, Berlin
- DIN EN 12464 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten. Teil 1 (2011) Arbeitsstätten in Innenräumen. Teil 2 (2007) Arbeitsplätze im Freien. Beuth, Berlin
- DIN EN 12665 (2011) Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung. Beuth, Berlin
- DIN EN 14255 Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung. Teil 1 (2005): Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung. Teil 2 (2006): Sichtbare und infrarote Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz. Beuth, Berlin
- DIN EN 60447 (2004) Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung – Bedienungsgrundsätze. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 6385 (2004) Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 7730 (2006) Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Beuth, Berlin (Berichtigung 2007)
- DIN EN ISO 7731 (2008) Ergonomie - Gefahrensignale für öffentliche Bereiche und Arbeitsstätten - Akustische Gefahrensignale. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 9241 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 210 (2011) Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. Teil 302 (2008) Terminologie für elektrooptische Anzeigen. Teil 303 (2011) Anforderungen an elektronische optische Anzeigen. Teil 304 (2008) Prüfverfahren zur Benutzerleistung für elektronische optische Anzeigen. Teil 306 (2008) Vor-Ort-Bewertungsverfahren für elektronische optische Anzeigen. Teil 307 (2008) Analyse- und Konformitätsverfahren für elektronische optische Anzeigen. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 9612 (2009) Akustik - Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren). Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 10075-2 (2000) Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 11064-3 (2000) Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen – Teil 3: Auslegung von Warteräumen. Beuth, Berlin (Berichtigung 2003)
- DIN EN ISO 11690 Akustik –Richtlinien für die Gestaltung lärmärmer maschinenbestückter Arbeitsstätten. Teil 1 (1997) Allgemeine Grundlagen. Teil 2 (1997) Lärminderungsmaßnahme. Beuth, Berlin
- Handbuch der Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation (1980) VDI Verlag, Düsseldorf
- Jenner R-D, Kaufmann H, Schäfer D (1978) Planungshilfen für die ergonomische Gestaltung – Zeichenschablonen für die menschliche Gestalt, Maßstab 1:10. IWA-Riehle, Esslingen
- Johannsen G (1993) Mensch-Maschine-Systeme. Springer, Berlin
- Kahneman D (1973) Attention and effort. Englewood Cliffs. Prentice-Hall, NJ
- Kern P, Schmauder M (2005) Einführung in den Arbeitsschutz für Studium und Betriebspraxis. Hanser, München
- Landau K, Luczak H, Laurig W (Hrsg) (1997) Softwarewerkzeuge zur ergonomischen Arbeitsgestaltung. Verlag Institut für Arbeitsorganisation e.V., Bad Urach

- Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, veröffentlicht im Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 8 am 8.3.2007
- Luczak H, Volpert W (1997) Handbuch der Arbeitswissenschaft. Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Miller GA (1956) The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychol Rev* 63:81–97
- Mühlstedt J, Kaußler H, Spanner-Ulmer B (2008) Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAx- und PLM-Systeme. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 62:79–86
- Neudörfer A (1981) Anzeiger und Bedienteile – Gesetzmäßigkeiten und systematische Lösungssammlungen. VDI Verlag, Düsseldorf
- NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health Work Practices Guide/or Manual Lifting, NIOSH Technical Report No. 81-122, US Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, OH. 1981
- Norman, D.A. and Bobrow, D.G. On data-limited and resource limited processes. *Cognitive Psychology*, 7:44–64.1975
- Richenhagen G, Prümper J, Wagner J (2002) Handbuch der Bildschirmarbeit, 3. Aufl. Luchterhand, Neuwied
- Rohmert W (1960) Statische Haltearbeit des Menschen. Beuth, Berlin
- Rohmert W (1962) Untersuchungen über Muskelermüdung und Arbeitsgestaltung. Beuth, Berlin
- Rohmert W, Rutenfranz J (Hrsg) (1983) Praktische Arbeitsphysiologie. Thieme Verlag, Stuttgart
- Schlick C, Bruder R, Luczak H (2010) Arbeitswissenschaft. Springer, Berlin
- Schmidt E (1981) Sicherheit und Zuverlässigkeit aus konstruktiver Sicht. Ein Beitrag zur Konstruktionslehre. Diss. TH Darmstadt
- Schmidtke H (Hrsg) (1993) Lehrbuch der Ergonomie, 3. Aufl. München: Hanser Size Germany – Die deutsche Reihenmessung: Pressekonferenz 2009. [http://www.sizegermany.de/pdf/SG\\_Abschlusspräsentation\\_2009.pdf](http://www.sizegermany.de/pdf/SG_Abschlusspräsentation_2009.pdf) (17.12.2012)
- Steinberg U, Windberg HJ (1997) Leitfaden Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten - Empfehlungen für den Praktiker. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.), Sonderdruck S 43, Dortmund/Berlin, NWirtschaftsverlag, Bremerhaven,
- VDI-Richtlinie 2057 Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Blatt 1 (2002) Ganzkörper-Schwingungen. Blatt 2 (2012) Hand-Arm-Schwingungen. Blatt 3 (2012) Ganzkörper-Schwingungen an Arbeitsplätzen in Gebäuden. Beuth Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 2058 Blatt 2 (1988) Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Berlin: Beuth
- VDI-Richtlinie 2081 Geräuscherzeugung und Lärmmindehung in Raumlufttechnischen Anlagen. Blatt 1 (2001). Blatt 2 (2005) Berlin: Beuth
- VDI-Richtlinie 2242 Konstruieren ergonomiegerechter Erzeugnisse. Blatt 1 (1986) Grundlagen und Vorgehen. Blatt 2 (1986) Arbeitshilfen und Literaturzugang. Berlin: Beuth
- VDI-Richtlinie 3720 Lärmarm Konstruieren. Blatt 2 (1982) Beispielsammlung. Blatt 4 (1984) Rotierende Bauteile und deren Lagerung. Blatt 5 (1984) Hydrokomponenten und –systeme. Blatt 9.1 (1990) Minderung der Körperschallanregung im Zahneingriff. Berlin: Beuth
- VDI/VDE-Richtlinie 3850 Nutzergerechte Gestaltung von Bediensystemen für Maschinen. Blatt 1 (2000) Grundlagen. Blatt 2 (2002) Interaktionsgeräte für Bildschirme. Blatt 3 (2004) Dialoggestaltung für Touchscreens. Berlin: Beuth
- Vedder J, Laurig W (1994) ErgonLIFT Rechner-Programm zur Gefährdungsanalyse beim manuellen Handhaben von Lasten - Umsetzung der EWG-Richtlinie 90/269/EWG. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 48/2: 67–74
- Wickens, C.D. Processing resources in attention.In R. Parasuraman & R. Davies (Eds.), Varieties of attention. New York: Academy Press. (1984).

## Abschnitt 13.9

- DIN 4844-1 Sicherheitskennzeichnung. Begriffe, Grundsätze und Sicherheitszeichen. Beuth, Berlin  
 DIN 4844-2 Sicherheitskennzeichnung. Sicherheitsfarben. Beuth, Berlin  
 DIN 4844-3 Sicherheitskennzeichnung; Ergänzende Festlegungen zu Teil 1 und Teil 2. Beuth, Berlin  
 Frick R (1997) Erzeugnisqualität und Design. Berlin: Verlag Technik 1996. Fachmethodik für Designer – Arbeitsmappe. An-Institut CA & D e.V, Halle  
 Klöcker L (1981) Produktgestaltung, Aufgabe – Kriterien – Ausführung. Springer, Berlin  
 Seeger H (1980) Technisches Design. Expert Verlag, Grafenau  
 Seeger H (1983) Industrie-Designs. Expert Verlag, Grafenau  
 Seeger H (1992) Design technischer Produkte, Programme und Systeme. Anforderungen, Lösungen und Bemerkungen. Springer, Berlin  
 Tjalve E (1978) Systematische Formgebung für Industrieprodukte. VDI Verlag, Düsseldorf  
 VDI-Richtlinie 2224 (1972) Formgebung technischer Erzeugnisse. Empfehlungen für den Konstrukteur. VDI-Verlag, Düsseldorf

## Abschnitt 13.10 Prozesskette

- Borsdorf R (2007) Methodischer Ansatz zur Integration von Technologiewissen in den Produktentwicklungsprozess. Dissertation RWTH Aachen, Shaker, Aachen  
 DIN 8580 N.N. (2003, September) Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.  
 Fallböhmer M (2000) Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation RWTH Aachen, Shaker, Aachen  
 Wegner H (2007) Ein System zum fertigungstechnologischen Wissensmanagement. Dissertation RWTH Aachen, Shaker, Aachen  
 Willms H (2008) Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Dissertation RWTH Aachen

## Urformen

- DIN8580 N.N. (2003, September) Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.

## Umformen

- DIN EN 10243-1 N.N. (2000, Juni) Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen – Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen.  
 DIN EN 10243-2 N.N. (2000, Juni) Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen – Teil 2: Warm hergestellt in Waagerecht-Stauchmaschine.  
 DIN EN 10254 N.N. (2000, April) Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Allgemeine technische Lieferbedingungen.  
 DIN 8582 N.N. (2003, September) Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung, Unterteilung, Alphabetische Übersicht. Beuth Verlag, Berlin  
 Klocke F, König W (2006) Fertigungsverfahren Umformen, 5., neu bearb, Aufl. Springer, Berlin-Heidelberg  
 Richtlinie VDI 3138-1 (1998, März ) Kaltmassivumformen von Stählen und NE-Metallen. Grundlagen für das Kaltfließpressen.

### **Trennen: Spanen, EDM, ECM und Laser**

- DIN 8580 N.N. (2003, September) Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.
- DIN 8590 N.N. (2003, September) Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- Klocke F, König W (2007) Fertigungsverfahren Bd. 3 – Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung, 4., neu bearb. Aufl. Springer, Berlin
- VDI 3400 N.N. (1974, Juni) Elektroerosive Bearbeitung – Begriffe, Verfahren, Anwendung.
- VDI 3401 N.N. (2009, Januar) Elektrochemisches Abtragen – Formabtragen.
- VDI 3402-1 N.N. (1976, März) Elektroerosive Bearbeitung – Definitionen und Terminologie.
- VDI 3402-4 N.N. (1994, März) Anwendung der Funkenerosion.

### **Beschichten**

- Dobkin DM, Zuraw MK (2003) Principles of chemical vapor deposition – what's going on inside the reactor. Dordrecht
- Kanani N (2009) Galvanotechnik – Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie, 2., überarb. und erw. Aufl., München
- Martin PM (2009) Handbook of deposition technologies for films and coatings – science, applications and technology, 3. Aufl. Oxford
- Mattox DM (2010) Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing, 2. Aufl. Amsterdam

### **Aus Beschriftungen der alten Abbildungen:**

- AEG-Telefunken (1971) Biegen. Werknormblatt 5 N 8410.
- Bode K-H (1984) Konstruktions-Atlas „Werkstoff- und verfahrensgerecht konstruieren“. Hoppenstedt, Darmstadt
- Feldmann HD (1959) Konstruktionsrichtlinien für Kaltfließpreßteile aus Stahl. Konstruktion 11:82–89
- FVPM Fachverband Pulvermetallurgie (1971) Sinterteile – ihre Eigenschaften und Anwendung. Beuth, Berlin
- Hänchen R (1964) Gegossene Maschinenteile. Hanser, München
- Jung A (1959) Schmiedetechnische Überlegungen für die Konstruktion von Gesenkschmiedestücken aus Stahl. Konstruktion 11:90–98
- Matousek R (1974) Konstruktionslehre des allgemeinen Maschinenbaus. Springer, Berlin (1957, Reprint)
- Niemann G (2001) Maschinenelemente, Bd. 1. Springer, Berlin (1963, 2. Aufl.; 1975, 3. Aufl.)
- Oehler G, Weber A (1972) Steife Blech- und Kunststoffkonstruktionen. Konstruktionsbücher, Bd. 30. Springer, Berlin
- Rögnitz H, Köhler G (1959) Fertigungsgerechtes Gestalten im Maschinen- und Gerätebau. Teubner, Stuttgart
- VDI/ADB-Ausschuss Schmieden (1975) Schmiedstücke – Gestaltung, Anwendung. Hagen: Informationsstelle Schmiedstück-Verwendung im Industrieverband Deutscher Schmieden
- ZGV-Lehrtafeln: Erfahrungen, Untersuchungen, Erkenntnisse für das Konstruieren von Bauteilen aus Gusswerkstoffen. Gießerei-Verlag, Düsseldorf

ZGV-Mitteilungen: Fertigungsgerechte Gestaltung von Gusskonstruktionen. Gießerei-Verlag, Düsseldorf

Zünkler B (1962) Gesichtspunkte für das Gestalten von Gesenkschmiedeteilen. Konstruktion 14:274–280

### Abschnitt 13.11

- Apalak MK, Davies R, Apalak ZG (1995) Analysis and design of adhesively-bonded double-containment corner joints. *J Adhes Sci Technol* 9:267–294
- Baldan A (2004) Adhesively-bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials: Mechanical and environmental durability performance. *J Mater Sci* 39:4729–4797
- Bode K-H (1984) Konstruktions-Atlas „Werkstoff- und verfahrensgerecht konstruieren“. Hoppenstedt, Darmstadt
- Chamis CC, Murthy PLN (1991) Simplified procedures for designing adhesively bonded composite Joints. *J Reinf Plast Compos* 10:29–41
- Davies R, Khalil AA (1990) Design and analysis of bonded double containment corner joints. *Int J Adhes Adhes* 10:25–30
- Fuhrmann U, Hinterwaldner R (1984) Konstruktionskatalog für Klebeverbindungen tragender Elemente. Adhäsion – Kleb Dicht 28:26–29
- Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: 2006.
- Hashim SA, Cowling MJ, Winkle IE (1990) Design and assessment methodologies for adhesively bonded structural connections. *Int J Adhes Adhes* 10:139–145
- Heitz E (1971) Konstruktive Gestaltung in Der Klebetechnik. Industriezeiger, Bd 93:2185–2189
- Käufer H (1984) Design of constructive adhesive joints for the optimization of manufacture and strength. *Konstruktion* 36:371–377
- Lees WA (1986) Bonding composites. *Int J Adhes Adhes* 6:171–180
- Marques EAS, Da Silva LFM (2008) Joint strength optimization of adhesively bonded patches. *J Adhes* 84:915–934
- Moulds RJ (2006) Design and stress calculations for bonded joints. In: Cognard P (Hrsg) Adhesives and sealants: general knowledge, application techniques, new curing techniques. Elsevier Science & Technology
- Niemann G (2001) Maschinenelemente, Bd. 1. Springer, Berlin (1963, 2. Aufl.; 1975, 3. Aufl.)
- Reihlen H (1996) Normung. In: Hütte. Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 30. Aufl. Springer, Berlin
- Siebert, M.; Schlimmer M.: Prozesssicheres Kleben von Rundsteckverbindungen aus metallischen Werkstoffen unter rauen Fertigungsbedingungen. 5. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebetechnik. Paper 20, Düsseldorf, 15. und 16. Februar 2005.
- Stuart TP, Crouch IG (1992) The design, testing and evaluation of adhesively bonded, interlocking, tapered joints between thick aluminium alloy plates. *Int J Adhes Adhes* 12:3–8
- To QD, He QC, Cossavella M, Morcant K, Panait A (2009) Stress analysis of the adhesive resin layer in a reinforced pin-loaded joint used in glass structures. *Int J Adhes Adhes* 29:91–97
- Ulmer K, Hennig G (1962) Die konstruktive Gestaltung der Metallklebverbindung. Mitt Forsch Ges Blechverarb.
- Veit H-J, Scheermann H (1972) Schweißgerechtes Konstruieren. Fachbuchreihe Schweißtechnik Nr. 32. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf

## Abschnitt 13.12

- AUDI AG (03/2010) [www.Audi.de](http://www.Audi.de)
- Boothroyd G (2005) Assembly Automation and Product Design. Taylor & Francis
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (10/2004) Innovationen für eine ressourceneffiziente Produktion. <http://www.bmbf.de/foerderungen/3050.php>
- Bundesministerium für Umwelt (08/2010) Naturschutz und Reaktorsicherheit. Thema: Europa und Abfallwirtschaft. [http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/europa\\_und\\_abfall/doc/36500.php](http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/europa_und_abfall/doc/36500.php)
- Brecher C, Schuh G (2010) Vorlesung: Fertigungs- und Montagegerechte Konstruktion. RWTH Aachen
- DIN 8593 (09/2003) Fertigungsverfahren. Fügen
- European Comission Environment (08/2010) European Policies and Strategies: Waste. <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>
- Eversheim (03/1980) W Organisation in der Produktionstechnik Band 4, Fertigung und Montage, VDI Verlag
- GRI (10/2010) <http://www.grimmm-automatisierung.de>, 06/2010
- Hesse S (1994) Montage-Atlas, Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren. Hoppenstedt GmbH Technik Tabellen Verlag, Darmstadt
- Konold P, Reger H (2003) Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung, 2. Aufl. Vieweg, Wiesbaden
- Lotter B, Wiendahl H-P (2006) Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Springer
- Meißner H-R (2009) Automobilproduktion in der Prozess- oder Wertschöpfungskette. Brandenburg
- Rupp O (08/2010) MTU Maintenance Hannover GmbH, Technikbericht (Eigenverlag). Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken, <http://www.mtu.de>
- Spur G (1986) Handbuch der Fertigungstechnik, Bd. 5: Fügen, Handhaben und Montieren. Carl Hanser, München
- Verein Deutscher Ingenieure (1987) Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren, Methoden und Hilfen. VDI-Verlag
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 2860 (1990) Montage und Handhabungstechnik.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 2206 (2004) Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 2074 (2010a) Recycling in der Technischen Gebäudeausrüstung.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 2343 (2010b) Recycling elektrischer und elektronischer Geräte.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 4080 (2010c) Automobilverwertung; Qualität von Kfz-Gebrauchteilen.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 4082 (2010d) Automobilverwertung, Trockenlegung und Vorbereitung von Kfz auf die Zerlegung/Demontage.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 4085 (2010e) Entwurf. Planung, Errichtung und Betrieb von Schrottplätzen.
- Wiendahl HP, Gerst D, Keunecke L (2004) Variantenbeherrschung in der Montag, Konzepte und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Springer-Verlag

## Abschnitt 13.13

DIN 31051: Instandhaltung; Begriffe und Maßnahmen. Beuth, Berlin

DIN 31052: Instandhaltung; Inhalt und Aufbau von Instandhaltungsanleitungen. Beuth, Berlin

- DIN 31054: Instandhaltung; Grundsätze zur Festlegung von Zeiten und zum Aufbau von Zeitsystemen. Beuth, Berlin
- Jagodejkin R (1997) Instandhaltungsgerechtes Konstruieren. Konstruktion 49(10):41–45
- Kljajin M (1997) Instandhaltung beim Konstruktionsprozess. Konstruktion 49(10):35–40
- Rosemann H (1981) Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Anlagen und Geräte. Springer, Berlin
- van der Mooren AL (1991) Instandhaltungsgerechtes Konstruieren und Projektieren. Konstruktionsbücher, Bd. 37. Springer, Berlin
- VDI-Richtlinie 2246 (1994) B1.1 (Entwurf): Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse – Grundlagen, Bl. 2 (Entwurf): Anforderungskatalog. VDI-Verlag, Düsseldorf

## Abschnitt 13.14

- Beitz W (1990) Möglichkeiten zur material- und energiesparenden Konstruktion. Konstruktion 42(12):378–384
- Beitz W, Meyer H (1981) Untersuchungen zur recyclingfreundlichen Gestaltung von Haushaltsgroßgeräten. Konstruktion 33:257–262, 305–315
- Beitz W, Pourshirazi M (1985) Ressourcenbewusste Gestaltung von Produkten. Wissenschaftsmagazin TU Berlin (8)
- Beitz W, Wende A (1991) Konzept für ein recyclingorientiertes Produktmodell. VDI-Berichte 906. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Brinkmann T, Ehrenstein GW, Steinhilper R, (1994) Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung. WEKA-Fachverlag, Augsburg
- Grote K-H, Schneider U, Fischer N (1997) Recyclinggerechtes Konstruieren von Verbundkonstruktionen. Konstruktion 49(6):49–54
- Hentschel C (1996) Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen. Berichte aus dem Produktions-technischen Zentrum Berlin. In: Spur G (Hrsg) Diss. TU Berlin
- Jorden W (1983) Recyclinggerechtes Konstruieren als vordringliche Aufgabe zum Einsparen von Rohstoffen. Maschinenmarkt 89:1406–1409
- Jorden W (1984) Recyclinggerechtes Konstruieren – Utopie oder Notwendigkeit. Schweizer Maschinenmarkt 23–25, 32–33.
- Kriwet A (1994) Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung. Produktionstechnik-Berlin. In: Spur G (Hrsg) Nr. 163. Hanser, München (1994). Diss. TU Berlin)
- Lindemann U, Mörtl M (2001) Ganzheitliche Methodik zur umweltgerechten Produktentwicklung. Konstruktion (11/12):64–67
- Meyer H (1983) Recyclingorientierte Produktgestaltung. VDI-Fortschrittsberichte Reihe 1, Nr. 98. VDI Verlag, Düsseldorf
- Meyer H, Beitz W (1982) Konstruktionshilfen zur recyclingorientierten Produktgestaltung. VDI-Z 124:255–267
- Neubert H, Martin U (1997) Analyse von Demontagevorgängen und Baustrukturen für das Produktrecycling. Konstruktion 49(7/8):39–43
- Neumann U (1996) Methodik zur Entwicklung umweltverträglicher und recyclingoptimierter Fahrzeugbauteile. GHS-Paderborn, Diss. Univ
- Nickel W (Hrsg) (1996) Recycling-Handbuch – Strategien, Technologien. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Pourshirazi M (1987) Recycling und Werkstoffsubstitution bei technischen Produkten als Beitrag zur Ressourcenschonung. Schriftenreihe Konstruktionstechnik Heft 12. In: Beitz W (Hrsg). TU Berlin, Berlin

- Schmidt-Kretschmer M (1994) Untersuchungen an recyclingunterstützenden Bauteilverbindungen. (Diss. TU Berlin). Schriftenreihe Konstruktionstechnik. In: Beitz W (Hrsg), 26, TU Berlin
- Schmidt-Kretschmer M, Beitz W (1991) Demontagefreundliche Verbindungstechnik – ein Beitrag zum Produktrecycling. VDI-Berichte 906. VDI Verlag, Düsseldorf
- Suhr M (1996) Wissensbasierte Unterstützung recyclingorientierter Produktgestaltung. Schriftenreihe Konstruktionstechnik. In: Beitz W (Hrsg), Nr. 33, TU Berlin (Diss.)
- VDI-Richtlinie 2221 (1993) Methodik zum Entwickeln technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI-Richtlinie 2243 (Entwurf) (2000) Recyclingorientierte Produktentwicklung. VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI-Richtlinie 2343 (1999–2001) Recycling elektrischer und elektronischer Geräte Blatt 1 (Grundlagen und Begriffe), Blatt 2 (Externe und interne Logistik), Blatt 3, Entwurf (Demontage und Aufbereitung), Blatt 4 (Vermarktung). VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI-Berichte Nr. 493 (1983) Spektrum der Verbindungstechnik – Auswählen der besten Verbindungen mit neuen Konstruktionskatalogen. VDI Verlag, Düsseldorf
- Weber R (1990) Recycling bei Kraftfahrzeugen. Konstruktion 42:410–414
- Weege R-D (1981) Recyclinggerechtes Konstruieren. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Wende A (1994) Integration der recyclingorientierten Produktgestaltung in dem methodischen Konstruktionsprozess. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 1, Nr. 239. VDI-Verlag, Düsseldorf (Diss. TU Berlin 1994)

---

# Qualitätssicherung in der Produktentwicklung und Konstruktion

14

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Produktentwicklung und Konstruktion sind für ein Unternehmen von zentraler Bedeutung. Hier werden die Voraussetzungen geschaffen, um Produktideen in herstellbare und vermarktbares Produkte umzusetzen. Fehler in der Entwicklung und Konstruktion können sich deshalb für ein Unternehmen gravierend auswirken. Zum Teil sehr große Rückrufaktionen verschiedener Art sind bekannt und kommen immer wieder vor. Nicht nur bei Massenprodukten, die aufgrund der hohen Stückzahl ein entsprechendes Risiko bilden, auch im Anlagenbau, wo zwar kleine Stückzahlen und Einzelfertigung üblich sind, die Anlagenkosten aber entsprechend hoch, müssen entsprechende Maßnahmen zur Absicherung der Entwicklungs- und Konstruktionsergebnisse durchgeführt werden. In Abb. 14.1 sind mögliche produkt- und verfahrensbezogene Fehler und ihre Folgen im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess beispielhaft aufgeführt.

Die Kontrollschleifen zur Überprüfung sollten möglichst kurz sein, um Fehler schnell korrigieren zu können und Folgefehler zu vermeiden. Die Kosteneinsparung bei einer frühen Korrektur ist dabei nennenswert, s. Abb. 14.2. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass auf Grund der komplexen Aufgaben der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung hier auch häufig Fehler entstehen.

Aus diesem Grund sind viele Unternehmen dazu übergegangen, sog. Quality Gates auch in der Entwicklung und Konstruktion einzuführen (Siegmund 2011; Schänzer 2011).

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

### Produktbezogene Fehler

#### Geometrie

- Bauraumverletzung
- fehlerhafte Schnittstellenkonfiguration

#### Funktion

- mangelnde Funktionserfüllung
- mangelndes Verhalten bei Versagen
- fehlerhafte Schnittstellenkonfiguration

#### Auslegung

- Kinematik
- Festigkeit
- ...

### Folgen (beispielhaft)

- Produkt lässt sich nicht montieren.

- Produkt erfüllt nicht die geforderten Leistungsdaten.

- Produkt ist nicht dauerfest.

### verfahrensbezogene Fehler

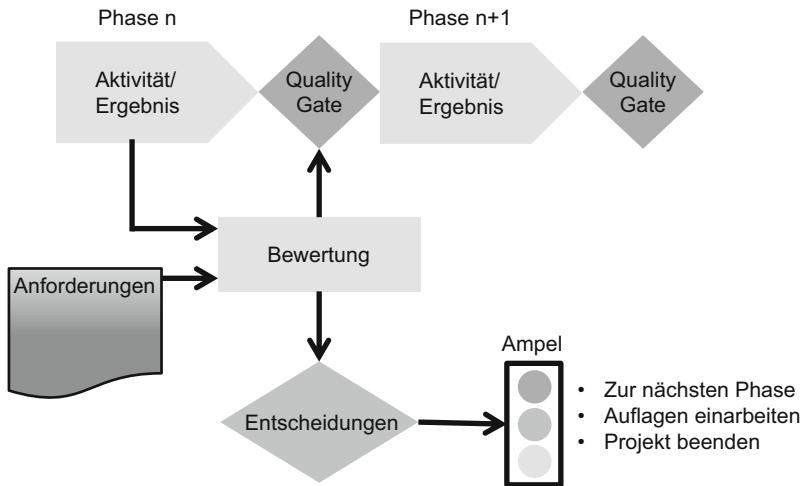
- mangelndes Dokumentenmanagement
- mangelndes Konfigurationsmanagement
- mangelndes Variantenmanagement
- mangelndes Änderungsmanagement
- mangelndes Versionsmanagement
- ...

- Forderungen der Produkthaftung sind nicht erfüllt.
- Produkt ist nicht servicefähig (Ersatzteilsteuerung).
- falsche Bauteile in der Produktion

**Abb. 14.1** Produkt- und verfahrensbezogene Fehler im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess und ihre Folgen



**Abb. 14.2** Kostenentstehung und -beeinflussung im Produktentstehungsprozess (Ehrlenspiel 2009; Braunsperger und Ehrlenspiel 1993)



**Abb. 14.3** Quality Gates in der Entwicklung und Konstruktion (in Anlehnung an Siegemund 2011)

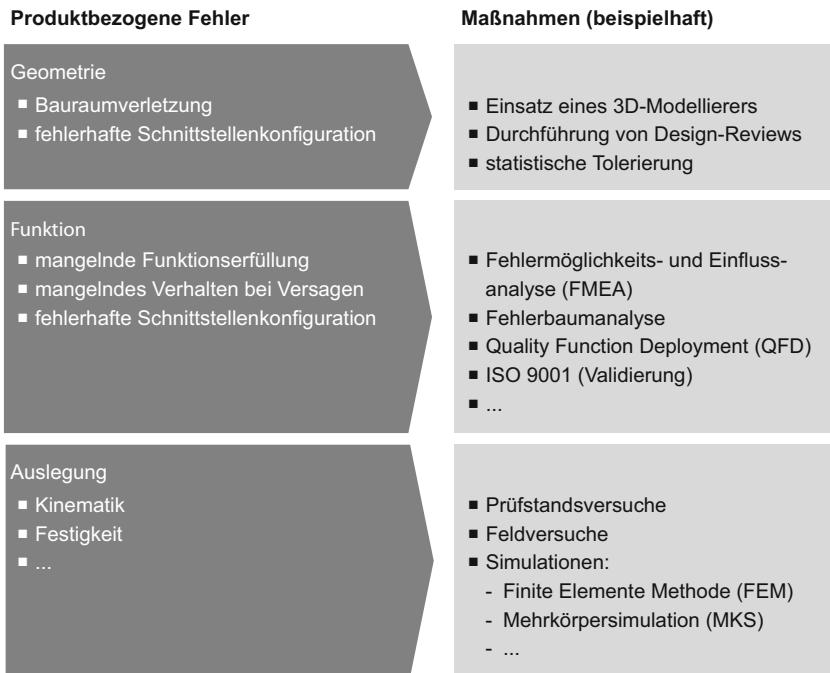
Quality Gates sind definierte Zeitpunkte, zu denen die Übereinstimmung, in diesem Fall von Entwicklungs- und Konstruktionsergebnissen, mit den definierten Zielen und Vorgaben geprüft wird. Ein Hilfsmittel hierzu sind z. B. die unten erläuterten Designreviews. In Abb. 14.3 ist das prinzipielle Vorgehen beim Erreichen eines Quality Gates in Anlehnung an Siegemund (2011) wiedergegeben.

Grundsätzlich führen produktbezogene Fehler typischer Weise zu Fehlern beim Produkt, die vom Kunden direkt wahrgenommen werden können. Hierzu gehören z. B. die mangelnde Funktionssicherheit, zu geringe Leistung usw. Bei diesen Fehlern leidet insbesondere die Akzeptanz des Produkts durch den Markt.

Verfahrensbezogene Fehler wirken sich normaler Weise nicht direkt auf das Produkt und seine Eigenschaften aus. Sie werden im Allgemeinen erst relevant, wenn auch produktbezogene Fehler sich zeigen und Mängel am Produkt offenbaren. Bei juristisch relevanten Fehlern, also immer dann, wenn Personen gefährdet sind oder zu Schaden kommen, treten Aspekte der Produkthaftung in den Vordergrund. Die Folgen für einzelne Mitarbeiter oder das Unternehmen können dann gravierend sein. Dies unterstreicht die Bedeutung einer guten Dokumentation des Produktentstehungsprozesses.

## 14.1 Maßnahmen zur Vermeidung produktbezogener Fehler (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Mögliche spezifische Maßnahmen zur Vermeidung der aufgeführten produktbezogenen Fehler im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess sind in Abb. 14.4 aufgeführt.



**Abb. 14.4** Spezifische Maßnahmen zur Vermeidung möglicher Entwicklungs- und Konstruktionsfehler (beispielhaft)

Wie in der Abb. 14.4 dargestellt, betreffen diese Fehler Aspekte der Geometrie, der Funktion und der Auslegung eines Produkts. Die aufgeführten Maßnahmen können nur beispielhaft und als Ausschnitt betrachtet werden. Viele Unternehmen haben heute eigene und sehr gut anwendbare und wirksame Verfahren und Maßnahmen zur Fehlervermeidung etabliert.

Viele der Maßnahmen stehen durch die Anwendung der heute üblichen rechnerunterstützten Hilfsmittel im Produktentstehungsprozess automatisch zur Verfügung. Im Folgenden soll auf einige der in Abb. 14.4 genannten Maßnahmen zur Vermeidung produktbezogener Fehler eingegangen werden.

### 14.1.1 Design Reviews

Bei Design Reviews handelt es sich um ein systematisches und **dokumentiertes** Durcharbeiten von Zeichnungen, Berechnungen, Lastenheften und sonstigen technischen Beschreibungen wie Wartungs- und Montageanleitungen zu einem **genau definierten Zeitpunkt** mit dem Ziel, sich einen Überblick über inhaltliche **Abweichungen gegenüber Vorgaben** zu verschaffen.

Zur Durchführung sind also vorbereitende Maßnahmen erforderlich. In Abb. 14.5 sind der Ablauf und die Schritte eines Design Reviews wiedergegeben.

**Abb. 14.5** Ablauf und Schritte eines Design Reviews

<b>Einladung</b>
zur Teilnahme am Design Review
<b>Vorbereitung</b>
Erstellen von Beurteilungskriterien und Checklisten zur Durcharbeitung/Prüfung des Review-Objekts
<b>Sitzung</b>
zur gemeinsamen Prüfung des Review-Objekts
<b>Nacharbeiten</b>
zur Behebung der gefundenen Fehler und Abweichungen
<b>Überprüfung</b>
der Überarbeitung und Freigabe des Objekts

Wann ein Design Review durchgeführt wird, kann auf zwei Arten festgelegt werden:

### 1. Ereignisgesteuerte Reviews

Die Durchführung eines Design Reviews ist abhängig vom Eintreten eines genau definierten Ereignisses, z. B. Fertigstellung von Unterlagen, Lieferung einer Baugruppe usw. Diese Review-Abhängigkeiten werden bei Schlüsselkomponenten und wichtigen Unterlagen gewählt.

### 2. Zeitgesteuerte Reviews

Die Durchführung eines Design Reviews geschieht an vorher festgelegten Zeitpunkten und in vorher festgelegten Abständen. Diese Review-Abhängigkeiten werden für Review-Objekte gewählt, deren Bearbeitung einen längeren Zeitraum erfordert. Durch das Review von Zwischenergebnissen werden Änderungskosten und Fehlentwicklungen vermieden.

Um die Arbeit bei der Durchführung des Reviews zu vereinfachen, sollten entsprechende standardisierte Unterlagen vorbereitet werden. In Abb. 14.6 ist eine Checkliste für ein Konstruktions-Review eines Bauteils wiedergegeben.

Wichtig bei der Erstellung solcher Checklisten ist der Konkretisierungsgrad der Beurteilungskriterien. Diese sollten sich möglichst, wie in Abb. 14.6 dargestellt, eindeutig beantworten lassen („erfüllt“, „nicht erfüllt“).

## 14.1.2 Fehlerbaumanalyse und Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA)

Zwei in der Praxis etablierte Methoden in der Qualitätssicherung sind die Fehlerbaumanalyse und die FMEA. Aus didaktischen Gründen werden diese Methoden im Teil I Abschn. 3.3.1 ausführlich behandelt.

# SIEMENS

Siemens Duewag Schienenfahrzeuge GmbH  
Bereich VT7 T7

Nr.	Prüfkriterien	nicht erfüllt	erfüllt	Bemerkungen
	Funktionssicherung			
	Stimmt die Kontur des Halterahmens mit der Voutenklappe und der Seitenwand des Fahrzeuges überein?			
	Ist die Anordnung der Befestigungsschienen des Wagenkastengerippes mit den Bohrungen des Halterahmens abgestimmt?			
	Wie erfolgt ein notwendiger Toleranzausgleich (Langlöcher?)			
	Befestigung der Scharniere abgestimmt?			
	Befestigung von Gasfedern vorgesehen?			
	Feststeller/Aufsteller vorgesehen?			
	Anschläge (Gummipuffer)			
	Sind zusätzliche Beilagen für Toleranzausgleich notwendig?			
	Ist die notwendige Stabilität der Halterahmen beachtet?			
	Welche Schließelemente sind verwendet? Ist der Halterahmen darauf abgestimmt (z.B. Auflaufkeil)?			

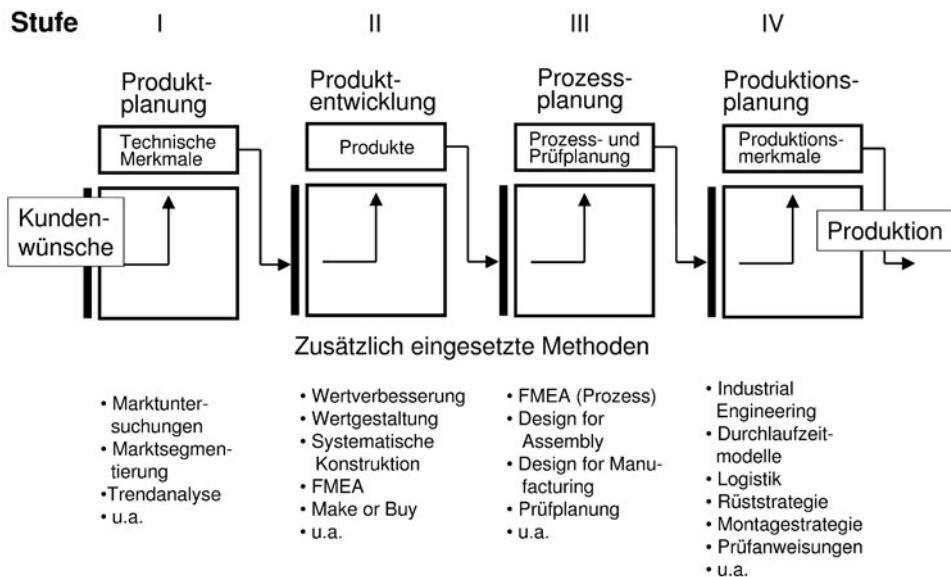
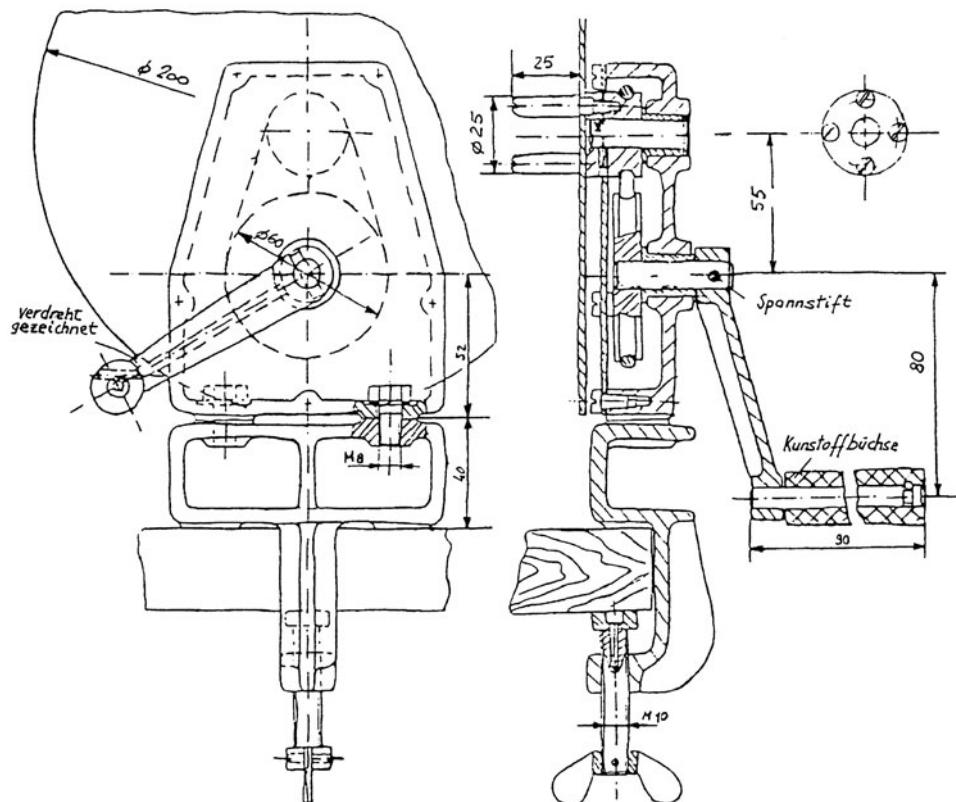
**Abb. 14.6** Checkliste für ein Konstruktions-Review

### 14.1.3 Methode QFD

Quality Function Deployment (QFD) ist eine Methodik zur Qualitätsplanung und -sicherung. Sie dient der systematischen Kundenorientierung der Produkt- und Prozessplanung. Die Kundenanforderungen werden gezielt in Produktmerkmale und diese wiederum in Betriebsabläufe und Produktionsanforderungen übertragen. Die Frage lautet dabei, ob aus Sicht des Kunden alle Funktionen realisiert werden können. Im deutschsprachigen Raum ist die QFD-Methodik erst 1992 von Akao (1992) veröffentlicht worden. Seitdem wurde sie schnell eingeführt (Clausing 1994; Danner 1996; Eder 1995; Kamiske und Brauer 1995; Kamiske 1994, 1996; Malorny 1996) und wird mittlerweile bereits in der Produktplanungsphase eingesetzt (Timpe und Fessler 1999).

Bei der QFD-Methodik handelt es sich um ein vierstufiges Verfahren. In Abb. 14.7 sind diese Stufen dargestellt. Wie bei der FMEA führt auch die QFD-Methode zu einer Integration der Teilprozesse des Produktentstehungsprozesses.

Wesentliches Arbeitsmittel von QFD ist das sog. House of Quality (Abb. 14.8 und 14.9). Es erlaubt in anschaulicher Weise die Umsetzung von Kundenwünschen, oft auch nur mit vagen Formulierungen, in Qualitätsmerkmale (Eigenschaften, Zielforderungen) des zu entwickelnden Produkts. Im Dach des Hauses werden die Wechselbeziehungen bzw. die

**Abb. 14.7** QFD als Integrationsinstrument (VDI 2247 1994)**Abb. 14.8** Grobentwurf für ein Lochband-Handspulgerät (nach Eder 1995)

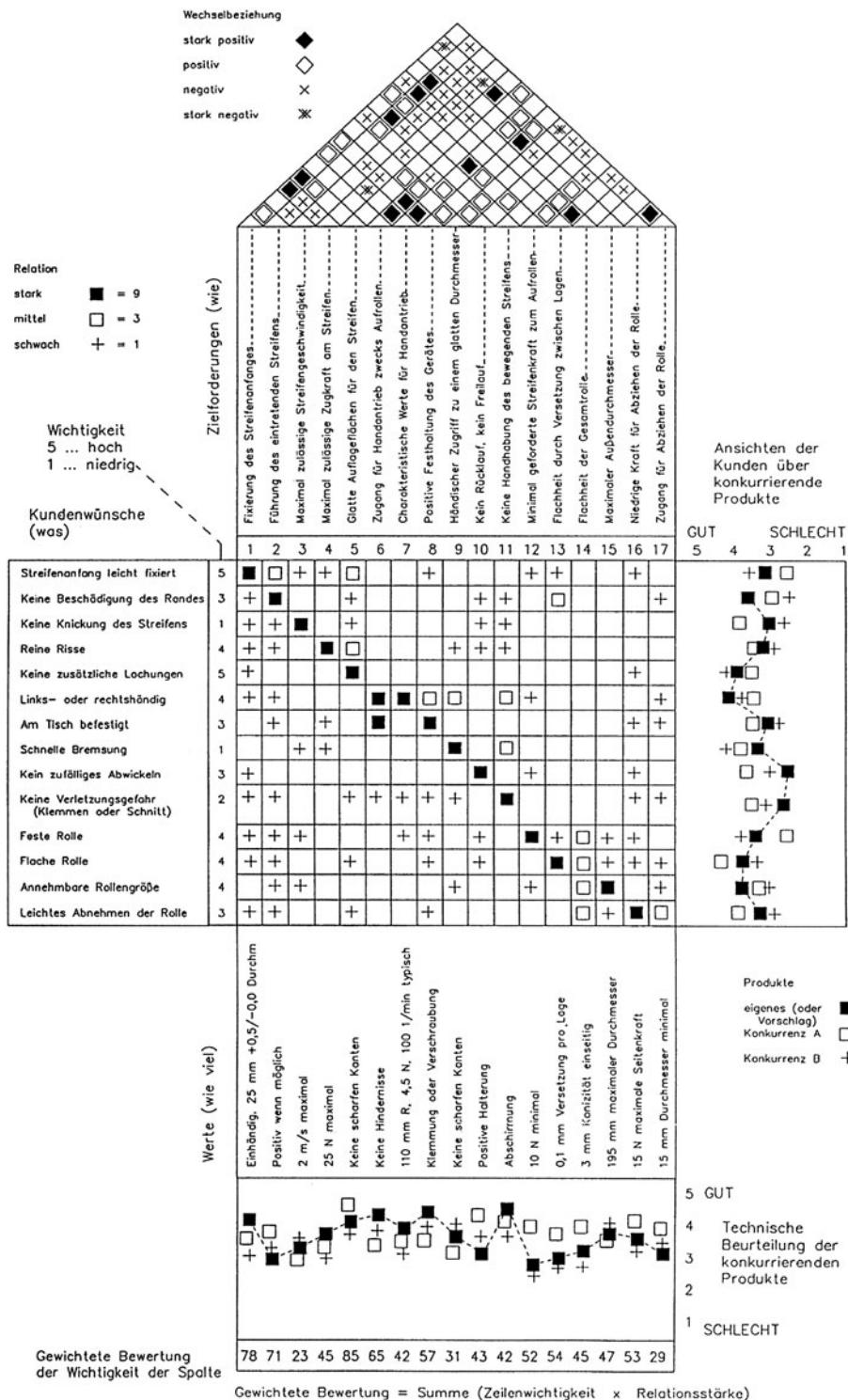


Abb. 14.9 House of Quality für Beispiel in Abb. 14.8 (Eder 1995)

Zielkonflikte zwischen den Zielforderungen untereinander gekennzeichnet, im Mittelquadrat die Beziehungen zwischen den Kundenwünschen und den Zielforderungen. Ferner können Gewichtungsfaktoren für die Kundenwünsche, eine Konkurrenz-Einschätzung der Kunden, Zielwerte als quantitative Formulierung der Zielforderungen, eine Beurteilung von Wettbewerbsprodukten sowie eine gewichtete Bewertung der Zielforderungen eingetragen werden.

Dieses Basisschema kann auch für die weiteren Phasen des Produktentstehungsprozesses eingesetzt werden, wobei das „Wie“ des vorhergehenden House of Quality das „Was“ des nachfolgenden ist (Bors 1994; Danner 1996). Die Anwendung von QFD im Rahmen konstruktionsmethodischen Vorgehens bringt folgenden Nutzen:

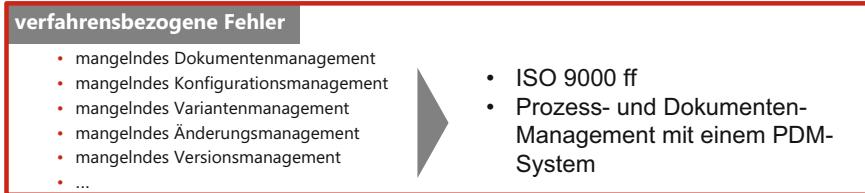
- Verbesserte Erstellung der Anforderungsliste durch bessere Darstellung der Kundenwünsche,
- Identifikation kritischer Produktfunktionen (kundenorientierte Funktionsstruktur),
- Definition kritischer technischer Anforderungen und Identifikation kritischer Bauteile und
- Erkennen zukunftsweisender Entwicklungs- und Kostenziele aufgrund von Kundenwünschen und Wettbewerbsanalysen.

Dieser Planungsaufwand erscheint vor allem bei größeren und langfristigen Projekten notwendig. Auch bei diesen sollten die bereits dargestellten einfacheren und damit schnelleren Methoden der Aufgabenklärung und des Aufstellens von Anforderungslisten als erste Basis durchgeführt werden.

---

## 14.2 Maßnahmen zur Vermeidung verfahrensbezogener Fehler (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Wie bereits weiter oben erläutert, wirken sich verfahrensbezogene Fehler häufig nicht sofort aus. Allerdings sind auch hier gravierende Folgen bereits im Produktentstehungsprozess (PEP) häufig zu beobachten. Diese entstehen dann insbesondere durch ein mangelndes Änderungsmanagement. So werden beispielsweise nach einer Konstruktionsänderung weiter alte Unterlagen zur Fertigung oder Bestellung von Komponenten verwendet. Eine Korrektur findet dann erst am fertig montierten Produkt statt oder beim Kunden, wenn das Produkt bereits ausgeliefert wurde. Die entstehenden Kosten und häufig auch ein Imageschaden sind dann entsprechend hoch. Grundsätzliche Maßnahmen zur Vermeidung verfahrensbezogener Fehler sind in Abb. 14.10 aufgeführt. Auch hier handelt es sich um grundsätzliche Möglichkeiten.



**Abb. 14.10** Grundsätzliche Maßnahmen zur Vermeidung verfahrensbezogener Fehler

### 14.2.1 Designlenkung nach ISO 9000 ff

Im Rahmen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses gilt es immer, einige grund-sätzliche Frage zu klären:

- Sind die richtigen Informationen vorhanden?
- Sind die Informationen beim richtigen Mitarbeiter?
- Hat der Mitarbeiter die Informationen zum richtigen Zeitpunkt?
- Sind die Art und der Umfang der Informationen richtig?

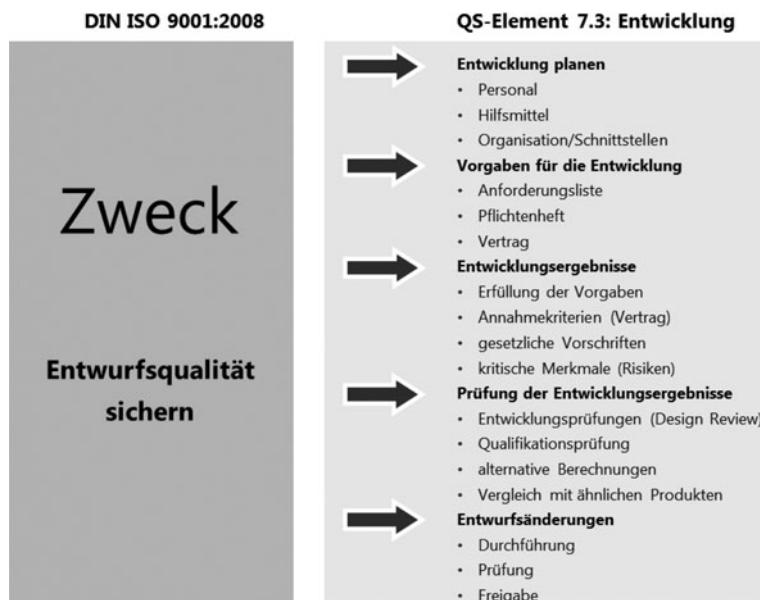
Hierbei handelt es sich um die Fragestellung, wie die notwendigen Informationen für die Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben gesteuert werden müssen, damit das Entwicklungs-/Konstruktionsziel erreicht werden kann. Sie bezieht sich also auf den Prozess. Diese Fragestellungen werden üblicherweise im Qualitätsmanagement-Handbuch (QMH) mit Hilfe von Verfahrens- und Arbeitsanweisungen näher beschrieben. Das QMH repräsentiert wesentlich die Ergebnisse der Qualitätsmanagementsystems (QM-System) des Unternehmens. Dabei bilden die Verfahrensanweisungen das grundsätzliche Vorgehen im Rahmen der betrachteten zu erfüllenden Aufgabe ab, stellen also den Prozess dar. Die Arbeitsanweisungen stellen die Ausführungsbestimmungen dar und legen die zu verwendenden Hilfsmittel und Dokumente fest. Sie beschreiben also die Art der zu erzeugenden Ergebnisse im Detail.

Zur Unterstützung beim Aufbau eines QMHs mit den Verfahrens- und Arbeitsanwei-sungen dienen die ISO 9000 (DIN EN ISO 9000 2005) und ISO 9001 (DIN EN ISO 9001 2008).

Für die Entwicklung und Konstruktion ist also die ISO 9001 relevant. Hier wiederum unterstützt der Abschn. 15.3 bei der Festlegung des Vorgehens, s. Abb. 14.11. Der Nachweis, dass ein Unternehmen die Anforderungen der ISO 9000 erfüllt, erfolgt durch Audits, die neutrale und dafür zertifizierte Stellen durchführen.

Im Folgenden sind die wesentlichen Inhalte von Verfahrensanweisungen wiedergegeben:

- Design- und Entwicklungsplanung:
  - Verantwortlichkeiten
  - Schnittstellenfestlegung

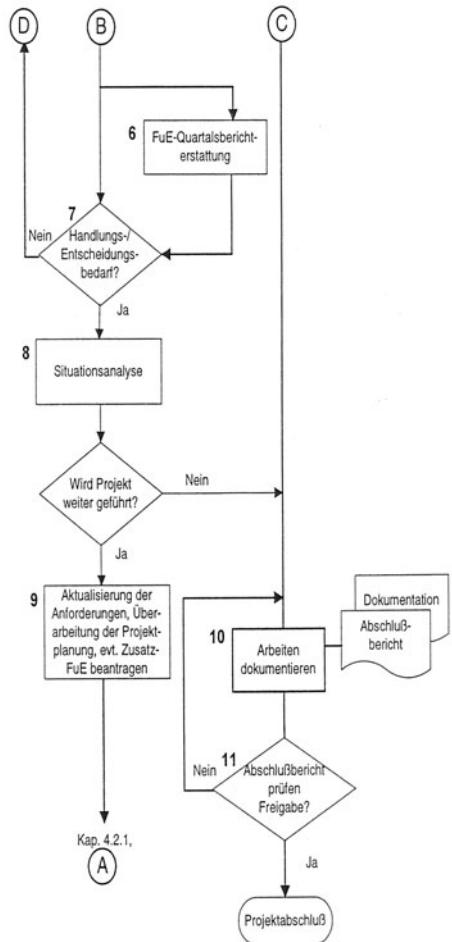


**Abb. 14.11** Inhalt des Elements 7 der ISO 9001 (DIN EN ISO 9001 [2008](#))

- Dokumentation des Informationsmanagements
- ...
- Feststellung und Dokumentation der Designvorgaben:
  - Überprüfung der Angemessenheit von Anforderungen
  - Klärung unvollständiger Informationen
  - ...
- Erlangung von dokumentierten Designergebnissen:
  - Festlegung von Annahmekriterien für Ergebnisse
  - Erfüllung der geltenden Vorschriften und Gesetze
  - Kennzeichnen sicherheitsrelevanter Designmerkmale
  - ...
- Durchführung und Dokumentation von Designverifikationen bezüglich der Erfüllung der Forderungen der Designvorgaben:
  - Durchführung und Protokollieren von Design Reviews
  - Durchführung von Qualitätsprüfungen
  - Erstellen alternativer Berechnungen
  - Vergleich des neuen Designs mit vorhandenen ähnlichen
  - ...

# SIEMENS

## Verkehrstechnik



- 6a** Die jeweilige GG-interne FuE-Berichterstattung ist GG-spezifisch zu regeln.  
Für gemeinsame GG-übergreifende Entwicklungen stellen die jeweiligen Entwicklungsverantwortlichen eine Berichterstattung gegenüber den jeweiligen PM's und TL's sicher.  
**Verantwortlich:** EL (E+M)  
**Mitwirkend:**  
**Ergebnis:** Quartals-Berichte verteilt
- 6b** Darüberhinaus finden zur weitergehenden Steuerung und Berichterstattung der gemeinsamen FuE-Themen gemeinsame FuE-Qualitätsgespräche mit VT 5 bis VT 8 und Sitzungen des AK IT statt.  
**Verantwortlich:** EL (E+M)  
**Mitwirkend:** Teilnehmerkreis gemäß Einladung  
**Ergebnis:** FuE-Durchsprache
- 7** Das Projekt ist auf Handlungs-/ Entscheidungsbedarf hin zu überprüfen. (z.B. FuE Zusatzantrag ...)  
**Verantwortlich:** Fachvorgesetzter PL  
**Mitwirkend:** PM, IM, EL, TL  
**Ergebnis:**
- 8** Ist Handlungsbedarf gegeben, erfolgt eine Situationsanalyse mit der Entscheidungsfindung über Weiterarbeit oder Abbruch des Projekts.  
**Verantwortlich:** Fachvorgesetzter des PL  
**Mitwirkend:** PM, IM, EL, TL  
**Ergebnis:** Notiz über Entscheidungsfindung
- 9** Die beschlossenen Maßnahmen werden in die Planung aufgenommen.  
**Verantwortlich:** PL  
**Mitwirkend:** IM, PM  
**Ergebnis:** Planungsunterlage (neue Version), ggf. Zusatz FuE-Antrag (Genehmigung wie Erstantrag siehe Kap. 4.2.1)
- 10** Nach Beendigung des Projekts wird ein Projektabschlußbericht mit Hinweis auf die Entwicklungsdokumentation erstellt und soweit nicht bereits projektbegleitend geschehen eine Dokumentation der Ergebnisse.  
**Verantwortlich:** PL  
**Mitwirkend:** IM, PM  
**Ergebnis:** Projektabschlußbericht und Entwicklungsdokumentation
- 11** Der Abschlußbericht wird vom FuE-Verantwortlichen und den jeweiligen PMs der GG geprüft und freigegeben. Die Abschlußberichte gehen zur Kenntnis an die GGL.  
**Verantwortlich:** FuE-Verantwortlicher  
**Mitwirkend:** PM  
**Ergebnis:** freigegebener Projektabschlußbericht

Verfahrenshandbuch VT 5 - VT 8 4.1 Produktentstehung und Entwicklung VA4.1 VT 5- VT 8	VT 6 QM 25.02.1999	Siemenssachnummer: A25000-X12-Q129-4-35	9 von 13
---	-----------------------	--	----------------

Copyright (C) Siemens AG 1999 All Rights Reserved. Nur für internen Gebrauch

**Abb. 14.12** Beispielhafte Verfahrensanweisung in Form eines Ablaufdiagramms mit Erläuterungen

- Durchführung von Designänderungen:
  - Dokumentation der Designänderungen
  - Genehmigung der Designänderungen
  - Dokumentation des erforderlichen Informationsmanagements (Standardverteiler...)
  - ...

Als beispielhafte Verfahrensanweisung ist in Abb. 14.12 der Ausschnitt einer Verfahrensanweisung wiedergegeben. In diesem Fall wurde sie in Form eines Ablaufdiagramms aufgebaut und die einzelnen Schritte mit kurzen Erläuterungen und Verweisen auf relevante andere Verfahrensanweisungen versehen. Diese Darstellungsform erhöht die Lesbarkeit und Akzeptanz des Dokuments gegenüber einem Fließtext.

### 14.2.2 Prozess- und Dokumentenmanagement auf PDM-System Basis

An dieser Stelle soll auf Teil II des Buches verwiesen werden. Im Abschn. 7.2.4 werden die Möglichkeiten eines PDM-Systems zur Prozessabbildung und Datensteuerung ausführlich beschrieben.

---

## Literatur

- Braunsperger M, Ehrlenspiel K (1993) Qualitätssicherung in Entwicklung und Konstruktion. Konstruktion 45(1993):397–405
- Ehrlenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung, 4. Aufl. Carl Hanser, München
- Schänzer S (2011) Interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Produktentwicklung. In KT 2011; 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011. 06. und 07 Oktober 2011 in Rostock. Shaker, Aachen
- Siegemund J (2011) Quality Gates machen Produktlebenszyklus transparent. [http://www.tmg-karlsruhe.de/\\_media/marktundinnovation/soarbeitenwir/Presse/pdf/PR03\\_QGatesmachenPLZtransparent.pdf](http://www.tmg-karlsruhe.de/_media/marktundinnovation/soarbeitenwir/Presse/pdf/PR03_QGatesmachenPLZtransparent.pdf). Zugegriffen: 25. Jan 2011

## Abschnitt 14.1.3

- Akao Y (1992) QFD – Quality Function Deployment. Verlag moderne Industrie, Landsberg
- Bors ME (1994) Ergänzung der Konstruktionsmethodik um Quality Function Deployment – ein Beitrag zum qualitätsorientierten Konstruieren. Produktionstechnik-Berlin (Hrsg. G. Spur), Nr. 159. Carl Hanser, München
- Clausing D (1994) Total quality development. A step-by-step guide to world-class, concurrent engineering. ASME Press, New York
- Danner S (1996) Ganzheitliches Anforderungsmanagement mit QFD – Ein Beitrag zur Optimierung marktorientierter Entwicklungsprozesse. Diss. TU München
- Eder WE (1995) Methode QFD-Bindeglied zwischen Produktplanung und Konstruktion. Konstruktion 47(1995):1–9

- Kamiske GF (1994) Die hohe Schule des Total Quality Management. Springer, Berlin
- Kamiske GF (1996) Rentabel durch TQM-Return an Quality. Springer, Berlin
- Kamiske GF, Brauer JP (1995) Qualitätsmanagement von A bis Z, 2. Aufl. Carl Hanser, München
- Malorny C (1996) Einführen und Umsetzen von Total Quality Management. Diss. TU Berlin. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin (Hrsg. G. Spur). IWF/IPK, Berlin
- Timpe K-P, Fessler M (1999) Der systemtechnische QFD-Ansatz (QFDS) in der Produktplanungsphase. Konstruktion 51(4):45–51
- VDI 2247 (1994) Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. VDI-EKV, Düsseldorf

### **Abschnitt 14.2.1**

- DIN EN ISO 9000 (2005) Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 9001 (2008) Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. Beuth, Berlin

---

## Teil IV

# Ansätze zur Rationalisierung in Entwicklung und Konstruktion

<b>15 Einleitung . . . . .</b>	769
Literatur . . . . .	771
<b>16 Grundsätzliche Überlegungen zur Rationalisierung . . . . .</b>	773
16.1 Voraussetzungen zur Rationalisierung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	773
16.2 Methode des integrierten Wissensmanagements zur Rationalisierung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	780
16.2.1 Produktfeatures . . . . .	780
16.2.2 Produktwissen . . . . .	782
16.2.3 Digitales Produkt . . . . .	784
16.2.4 Die Komponenten zur Umsetzung der Methode des integrierten Wissensmanagements . . . . .	786
16.3 Varianten- und Konfigurationsmanagement (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	792
16.4 Das Referenzprodukt als Ansatz zur Rationalisierung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	794
16.4.1 Die typische Ausgangssituation . . . . .	794
16.4.2 Die Referenzproduktstruktur . . . . .	795
16.4.3 Entwicklung der Referenzproduktstruktur für Referenzvariante für eine Produktgruppe . . . . .	797
16.4.4 Implementierung der Methode . . . . .	800
16.4.5 Arbeitsablauf bei Anwendung der Referenzproduktstruktur . . . . .	805
16.4.6 Bewertung der Methode . . . . .	808
16.5 Der agile Entwicklungs- und Konstruktionsprozess (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote) . . . . .	808

16.5.1	Produktentwicklung auf Basis von Analogiebetrachtungen (Jörg Thon) .....	811
Literatur .....	814	
<b>17</b>	<b>Produktarten zur Rationalisierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses</b> .....	817
17.1	Konventionelle Ansätze (Thomas Vietor, Carsten Stechert) .....	817
17.1.1	Baureihen .....	820
17.1.2	Baukästen .....	838
17.1.3	Plattformbauweise .....	856
17.1.4	Modularisierung und Produktarchitektur .....	859
Literatur .....	870	
<b>Sachverzeichnis</b> .....	873	

Jörg Feldhusen und Karl-Heinrich Grote

Der globale Wettbewerb und das World Wide Web haben für Kunden aller Art eine extreme Markttransparenz geschaffen. Vereinfacht ausgedrückt können sich Kunden, vom Massenkonsumenten bis zum Käufer eines Investitionsgutes, über Angebote und Preise von weltweiten Anbietern relativ problemlos informieren. Dieser Markttransparenz müssen sich heute sowohl große Konzerne als auch kleine- und mittelständische Unternehmen stellen und ihre Produkte zu „Weltmarktpreisen“ anbieten. Dieser Umstand bedeutet für die Unternehmen in den Hochlohnländern, dass sie für die Sicherstellung ihrer Wettbewerbsfähigkeit die Produkte zu vergleichbaren Preisen wie Produzenten aus den Niedriglohnländern anbieten müssen.

Wenn die Preise sinken, bedeutet dies also für die Unternehmen, dass auch die Kosten sinken müssen, um den notwendigen Gewinn erwirtschaften zu können. Die Kosten setzen sich für ein Produkt im Wesentlichen zusammen aus den Projektkosten, also z. B. den Kosten für die Gehälter der an der Entwicklung und Konstruktion Beteiligten, Kosten für eingekaufte Dienstleistungen, beispielsweise Berechnungen, usw. Dazu kommen die Kosten für das im Produkt eingesetzte Material und dessen Be- und Verarbeitung mit Montage und Prüfung bis zum fertigen Produkt.

In gesättigten Märkten erwartet der Kunde, dass die Produkte nach seinen Bedürfnissen entwickelt und angeboten werden, wodurch die gefertigten Stückzahl einer einzelnen

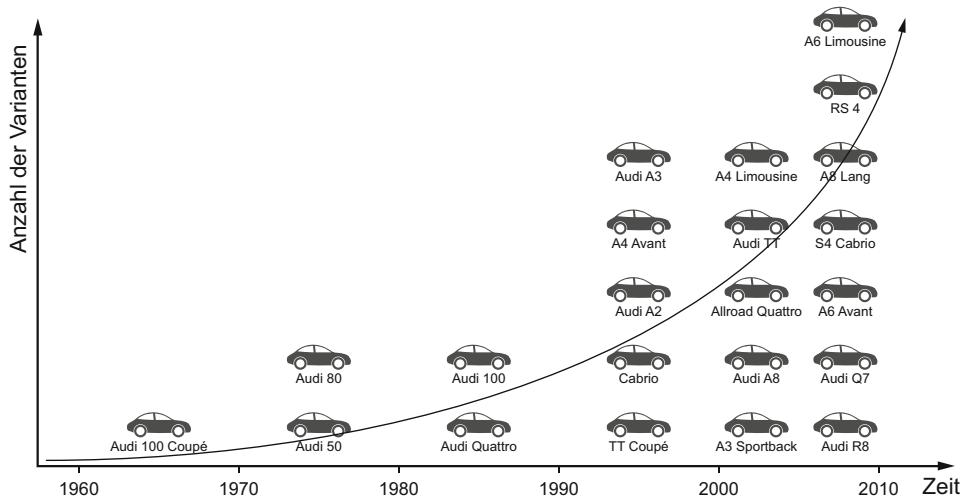
---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus,  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,  
Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-Mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016, Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de



**Abb. 15.1** Zunahme der Modellvielfalt über die Jahre am Beispiel Audi. (Quelle: Universität Hamburg, Institut für Industriebetriebslehre 2009)

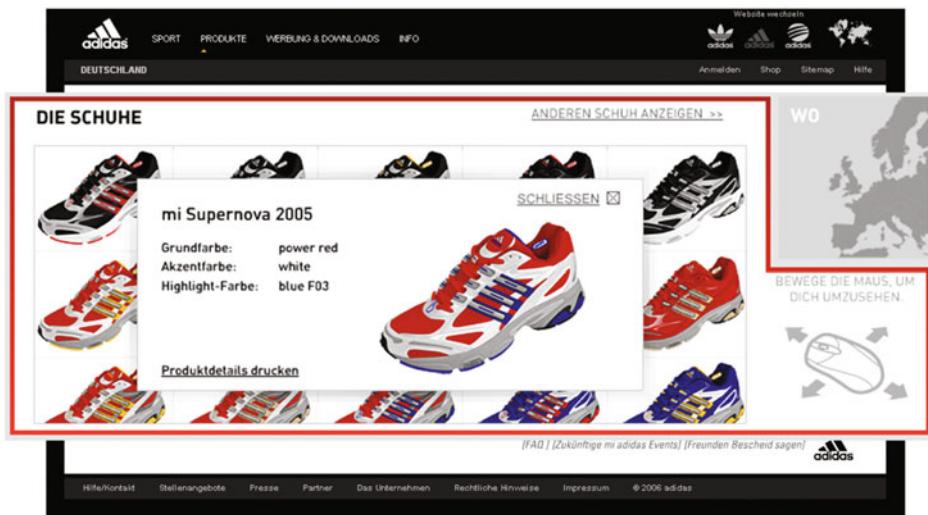
Produktvariante kleiner wird. Zur Steigerung des Umsatzes müssen die Unternehmen die Produktvarianz und damit die externe Vielfalt erhöhen (Feldhusen und Gebhardt 2008).

Die letzte Aussage gibt beispielhaft Abb. 15.1 wieder. Die Gründe für die hohe Produktvarianz liegen nicht nur in den unterschiedlichen Kundenforderungen für das gleiche Produkt. Vielmehr müssen Produkte häufig den für die jeweiligen Länder geltenden Richtlinien, Vorschriften und Gesetzen angepasst werden.

Diese geschilderten Phänomene lassen sich nicht nur im klassischen Anlagenbau beobachten, wo sie bereits in der Vergangenheit zum Alltag gehörten, sondern vielmehr zunehmend auch bei Großserienprodukten (Mass Customization). Es findet also auch in der Großserie eine Individualisierung der Produkte statt. Dies geht bei manchen Produkten so weit, dass der Kunde sich sein individuelles Produkt per Internet am Bildschirm zusammenstellen kann (s. Abb. 15.2).

Da, wie oben erwähnt, sich nicht nur die gefertigte Stückzahl pro Produkt reduziert, sondern gleichzeitig sich die Anzahl der verschiedenen Produkte erhöht, nimmt der Anteil der durch die Entwicklung und Konstruktion verursachten Kosten pro Produkt zu. Deshalb müssen auch in diesen Bereichen eines Unternehmens Maßnahmen zu Rationalisierung ergriffen werden.

Für den hier im Fokus stehenden Bereich Entwicklung und Konstruktion heißt dies, dass nicht nur die Anzahl der an einem Projekt beteiligten Mitarbeiter reduziert werden muss, sondern gleichzeitig auch deren Einsatzdauer, um die Projektkosten senken zu können. In den folgenden Abschnitten soll der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess hinsichtlich möglicher Rationalisierungsmaßnahmen betrachtet werden. Dazu werden zunächst



**Abb. 15.2** Kundenindividuelles, vom Kunden selbst online konfiguriertes Produkt. (Quelle: [www.adidas.com/miadidas](http://www.adidas.com/miadidas))

die grundsätzlichen Ansätze zur Rationalisierung dargestellt. Da sie im Wesentlichen in einer Standardisierung von Produktaspekten bestehen, gehen sie mit einem Verlust an Flexibilität der Funktionalität und der Gestaltung einher. In vielen Branchen kann dies aber nur bis zu einem gewissen Grad akzeptiert werden. Deshalb wird zunächst eine Rationalisierungsmethodik auf Basis von Produktfeatures eingeführt und ihre mögliche Anwendung vorgestellt. Die danach erläuterte Methodik der Referenzvariante nutzt einen höheren Standardisierungsgrad. Er umfasst nicht nur die Produktkomponenten, sondern auch die Produktstruktur.

Vorab sei schon angemerkt, dass fast alle diesbezüglichen Bemühungen auch Aktivitäten aufseiten der Produkte selbst erfordern. Viele Rationalisierungsmaßnahmen lassen sich nur auf Basis einer entsprechenden Produktgestaltung umsetzen. Die Maßnahmen auf der Seite des Produkts sind in Kapitel 17 dieses Teils beschrieben.

## Literatur

Feldhusen J, Gebhardt B (2008) Product Lifecycle Management für die Praxis. Springer

---

# Grundsätzliche Überlegungen zur Rationalisierung

16

Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote und Jörg Thon

---

## 16.1 Voraussetzungen zur Rationalisierung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Im vorhergehenden Kapitel wurde verdeutlicht, dass in der Entwicklung und Konstruktion sowohl Zeit als auch Kosten eingespart werden müssen. Bevor einzelne mögliche Maßnahmen behandelt werden, sollen zunächst die grundsätzlichen Möglichkeiten betrachtet werden, mit denen Zeit und Kosten eingespart werden können. Auf dieser Basis werden dann die heutigen Ansätze hergeleitet und erläutert.

Typischerweise unterliegen alle komplexeren Tätigkeiten, also Tätigkeiten, die sich aus mehreren Schritten zusammensetzen, einer sog. Lernkurve, wie sie beispielhaft in Abb. 16.1 wiedergegeben ist. Der Kurvenverlauf verdeutlicht den Übungs- oder Lerneffekt, der bei mehrmaligem Durchführen derselben Tätigkeit in kurzen Abständen eintritt. Bei geringer Stückzahl sind nach Abb. 16.1 deshalb die Kosten pro Stück deutlich höher. Die benötigten Stunden und damit die Kosten, z. B. für die Montage eines Produkts, sind wegen mangelnder Übung noch hoch. Ab einer bestimmten Anzahl der Ausführung, also Stückzahl in

---

J. Feldhusen (✉)

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Rheinisch-Westfälische  
Technische Hochschule Aachen, Steinbachstraße 54 B, 52074 Aachen, Deutschland  
E-mail: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

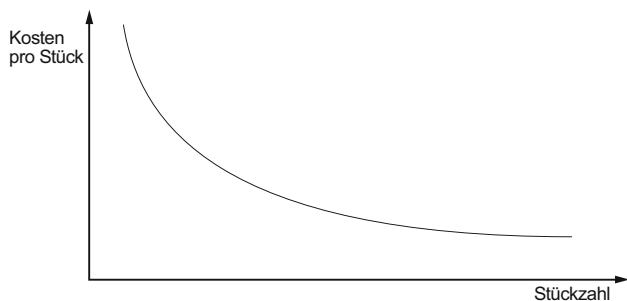
K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,  
Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Deutschland  
E-Mail: karl.grote@ovgu.de

J. Thon

Stryker Trauma GmbH, Professor-Küntscher-Straße 1, 24232 Schönkirchen, Deutschland  
E-Mail: joerg.thon@stryker.com

**Abb. 16.1** Typischer Lernkurvenverlauf



**Abb. 16.2** Typische Probleme heutiger Produkte

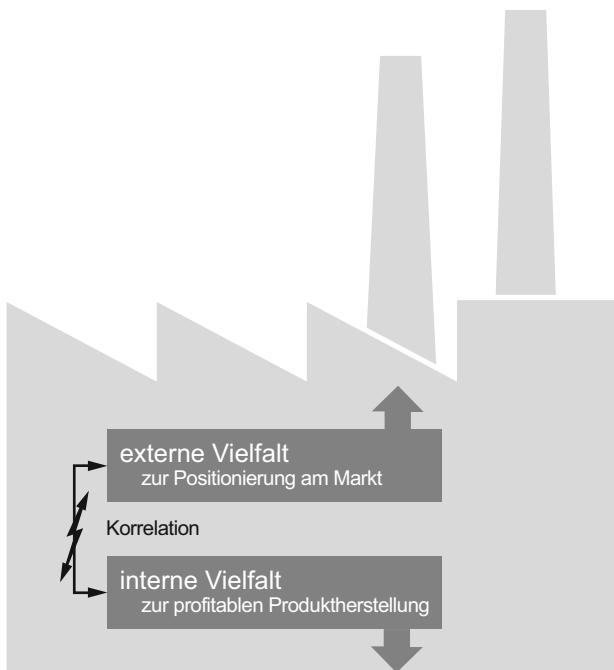
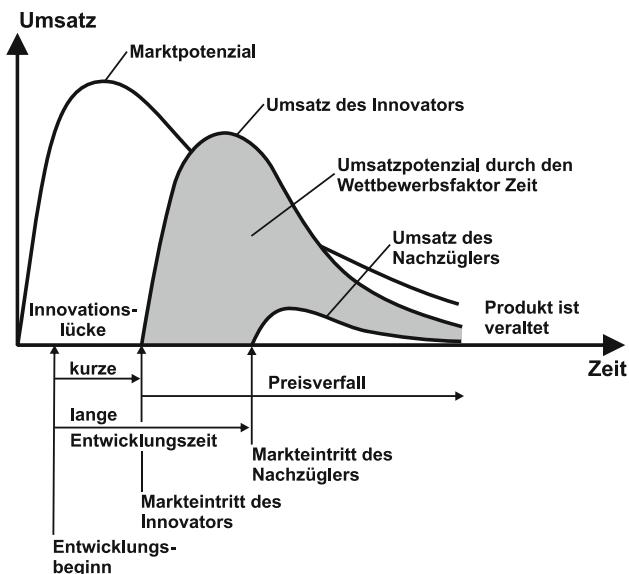


Abb. 16.1, ist kein Lerneffekt mehr vorhanden, und die Ausführungszeit und damit die Kosten pro Stück sind dann konstant. Dieses Optimum gilt es möglichst schnell zu erreichen (Schlick et al. 2010). Werden unterschiedliche Produkte in kleinen Stückzahlen gefertigt, ist dies nur schwer möglich.

Vereinfacht ausgedrückt wird das Optimum erreicht, indem dasselbe Produkt über einen längeren Zeitraum kontinuierlich in großen Stückzahlen hergestellt wird. Dies steht im Widerspruch zu den oben geschilderten Fakten und führt in Unternehmen zu einem Dilemma. Auf der einen Seite sollen möglichst wenige Produktvarianten über lange Zeit in großen Stückzahlen hergestellt werden, um in das Optimum der Lernkurve zu gelangen und so Kosten zu sparen. Andererseits verlangen die Kunden weltweit nach individuellen Produkten, die deshalb nur in kleinen Stückzahlen abgesetzt werden können. Dieses Dilemma gilt es möglichst aufzulösen, was allerdings nur durch einen Kompromiss möglich ist, wie später erläutert wird. In Abb. 16.2 sind die typischen Probleme heutiger Produkte dargestellt.

**Abb. 16.3** Umsatzpotenzial in Abhängigkeit vom Markteintritt (Kramer 1993)

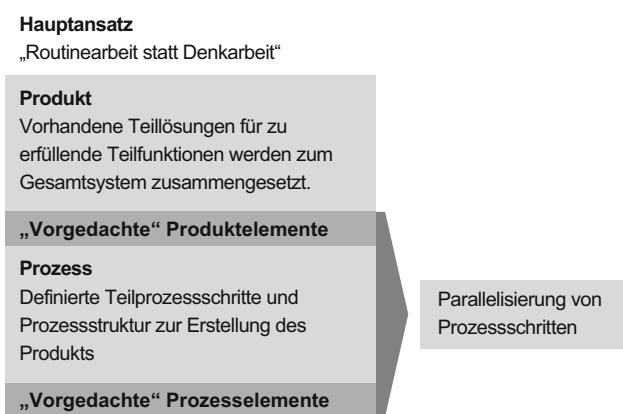


Auf der einen Seite werden heute kundenindividuelle Lösungen erwartet. Dies bedeutet im Sinne eines „Design to Customer“ eine Erhöhung der externen Vielfalt, also ein umfangreicheres Angebot verschiedener Produkte. Aus Kostengründen muss ein Unternehmen aber darauf achten, eine möglichst geringe Vielfalt an Produktkomponenten zu haben. Dies bedeutet schon einen Widerspruch, da typischerweise unterschiedliche Produkte auch unterschiedliche Komponenten erfordern. Danach führt eine hohe Anzahl unterschiedlicher Produkte, also eine Erhöhung der externen Vielfalt in Abb. 16.2, zwangsläufig auch zu einer Erhöhung der internen Vielfalt im Unternehmen, also zu unterschiedlichen Bauteilen, Baugruppen usw. Dies wird in Abb. 16.2 durch den Korrelationspfeil zwischen der internen und externen Vielfalt symbolisiert. Ein wesentliches Ziel bei den Rationalisierungsbestrebungen ist deshalb die Entkopplung dieser beiden Größen, anders ausgedrückt, mit möglichst wenigen Bauteilen und Baugruppen möglichst viele unterschiedliche Produkte erzeugen zu können. Hierzu sind bestimmte Produktarten erforderlich, wie beispielsweise Baukästen, Plattformen oder die Modulbauweise, wie sie später erläutert werden. Mit diesen Produktarten kann die Entkopplung der internen und externen Vielfalt gelingen. Zur Kostenreduktion sind aber noch zusätzliche Maßnahmen notwendig, wie bereits bei den Ausführungen zu Abb. 16.1 dargelegt wurde, gemeint ist hier die Standardisierung. Ein Unternehmen steht heute vor dem Problem, eine Balance zwischen der erforderlichen externen Produktrvielfalt und den Produktkosten zu definieren und umzusetzen.

Als dritte Größe der Rationalisierung muss noch die zeitliche Komponente berücksichtigt werden. Im Sinne von „Time to Market“ gilt es, Produkte frühzeitig an den Markt zu bringen, s. Abb. 16.3.

Zusammenfassend bedeutet Rationalisierung, in kürzerer Zeit mit weniger Ressourceneinsatz mehr Produkte zu vermarkten.

**Abb. 16.4** Hauptansatz zur Rationalisierung

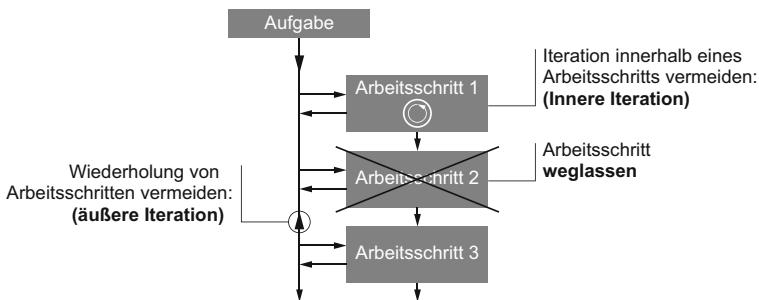


Die zu Abb. 16.1 gemachten Erläuterungen verdeutlichen, wie dies bewirkt werden kann und welches die Voraussetzungen dazu sind. Die in Abb. 16.1 dargestellte Lernkurve sagt aus, dass durch Übung, also häufiges Ausführen einer Tätigkeit, die Zeit für ihre Ausführung sich bis zu einem Optimum reduziert. Es stellt sich, anders ausgedrückt, Routine für die Ausführung der Tätigkeit ein. Ist dieses Optimum an Routine erreicht, ergibt sich für die Ausführung der Tätigkeit eine konstante Zeitdauer für alle weiteren selben Tätigkeiten. Deren Ausführungszeit kann deshalb geplant werden und hat die minimale Dauer.

Die gemachten Ausführungen legen den Schluss nahe, dass der wesentliche Ansatz zur Rationalisierung in der Standardisierung liegt. Eine Standardisierung kann sowohl die Komponenten eines Produkts, wie Bauteile, Baugruppen usw., umfassen, aber auch den Produktentstehungsprozess (PEP) mit seinen einzelnen Prozessschritten. In Abb. 16.4 ist der Hauptansatz zur Rationalisierung wiedergegeben.

Der Ansatz berücksichtigt den Umstand, dass Unbekanntes nur sehr schwer oder gar nicht geplant werden kann. Dies gilt für die Zeitdauer eines Arbeitsschritts und auch für sein Ergebnis. Im Falle der Entwicklung und Konstruktion kann es sich im Extremfall nach langen und aufwändigen Arbeiten herausstellen, dass eine geplante Lösung nicht möglich ist. Der in Abb. 16.4 dargestellte Ansatz beeinflusst die Zeit für die Ausführung einer Tätigkeit, hier die Entwicklung und Konstruktion, entsprechend Abb. 16.1, indem ein „Übungseffekt“ eintritt und so Tätigkeiten effektiv ausgeführt werden. Für das Produkt und seine Komponenten gilt dies gleichfalls. Standardkomponenten können aus den geschilderten Gründen effektiver und effizienter hergestellt werden. Neben dem „Übungseffekt“ zur Ausführung der notwendigen Herstellungsschritte lohnt es sich wegen der höheren Stückzahlen, da sie in mehreren Produktvarianten eingebaut werden, z. B. Spezialmaschinen einzusetzen, die nur für die Produktion der Standardkomponenten verwendet werden können.

Ein nicht zu unterschätzender Aufwand in Zeit und Kosten entsteht bei neuen Produkten auch aufgrund der notwendigen und vorgeschriebenen Dokumentation. Sind Produktkomponenten, wie Bauteile oder Baugruppen, bereits vorhanden, so gilt dies auch für deren Dokumentation. Häufig muss bei Produkten, die aus Standardkomponenten aufgebaut sind, nur noch die Gesamtdokumentation erstellt werden.



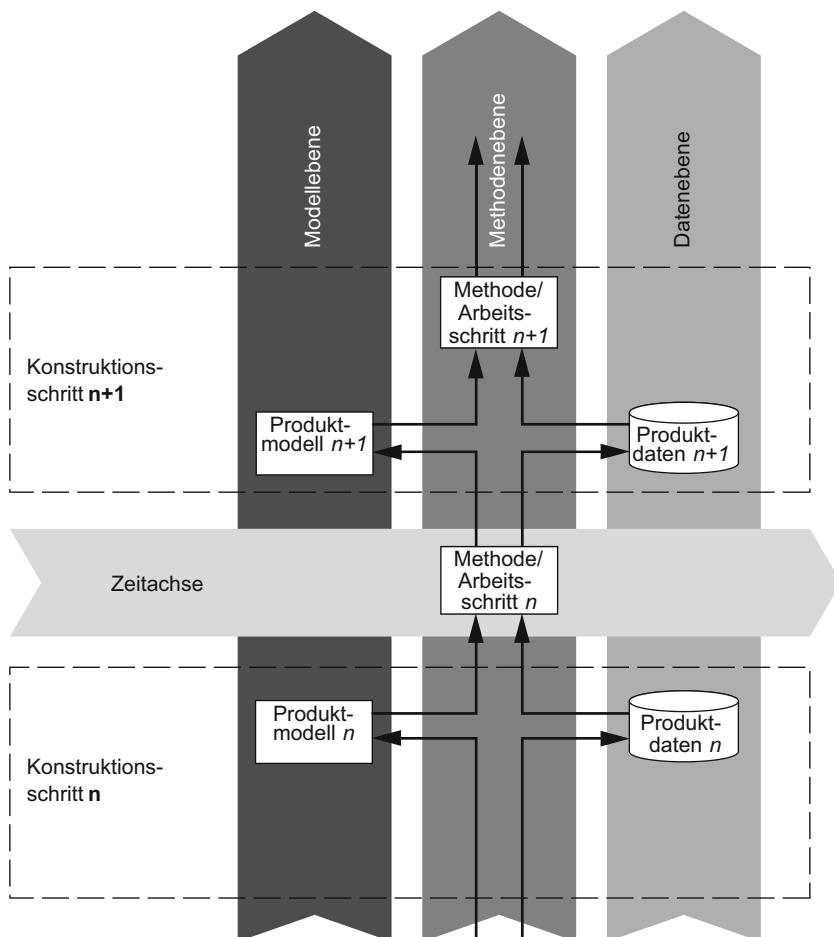
**Abb. 16.5** Grundsätzliche Möglichkeiten zur Rationalisierung eines Prozesses

Auf die Erstellung von Produkten aus Standardkomponenten wird in Kap. 17 ausführlich eingegangen. Hier sollen noch einmal Rationalisierungsansätze für den Produktentstehungsprozess kurz behandelt werden. Der wesentliche Ansatz ist bereits in Abb. 16.4 genannt worden. Er besteht darin, den Produktentstehungsprozess, wie das Produkt selbst, aus Standardelementen zusammenzusetzen. Dazu muss der Gesamtprozess in der Abfolge seiner einzelnen Schritte und deren Inhalte definiert werden, wie in Teil 1 des Buches beschrieben. Auf diese Weise wird die Struktur, also die Abfolge und Verknüpfung der einzelnen Prozessschritte, festgelegt. Diese selbst müssen ebenfalls hinsichtlich ihres Eingangs und Ausgangs, also das Ergebnis des Schritts, und des Inhalts, also was wie und womit getan werden soll, definiert sein. Für die Rationalisierung des Entwicklungsprozesses sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

1. Vermeiden der inneren Iteration. Damit ist das wiederholte Durchlaufen desselben Arbeitsschritts gemeint, weil dessen Arbeitsergebnisse nicht befriedigend waren.
2. Weglassen von Arbeitsschritten. Dies ist beispielsweise möglich, wenn vorhandene Komponenten zur Erfüllung einer Produktfunktion eingesetzt werden und deshalb nicht entwickelt werden müssen.
3. Vermeiden der äußeren Iteration. Mit äußerer Iteration ist das Zurückspringen vom aktuellen Arbeitsschritt zu einem vorgelagerten Arbeitsschritt und das nochmalige Durchlaufen dieses Prozessteils gemeint.

In Abb. 16.5 sind die oben aufgeführten Punkte hinsichtlich der Rationalisierung von Prozessen am Beispiel eines seriellen Prozesses dargestellt.

Innere Iteration ist beispielsweise notwendig, wenn die mindestens erforderlichen Sicherheitsbeiwerte für die Festigkeit eines Bauteils unterschritten werden. Das betreffende Bauteil ist umzugestalten, bzw. ein anderer Werkstoff zu wählen, und die Berechnung muss erneut durchlaufen werden. Arbeitsschritte können entfallen, wenn beispielsweise zur Erfüllung einer Funktion ein bereits verfügbares Bauteil oder eine Baugruppe eingesetzt wird und deshalb der Arbeitsschritt zu deren Konstruktion entfallen kann. Norm- oder Katalogteile sind solche Produktelemente. Die äußere Iteration, also das Zurückspringen vom aktuellen Arbeitsschritt zu einem im Produktentstehungsprozess vorgelagertem



**Abb. 16.6** Entwicklungs- und Konstruktionsprozess mit parallelen Konstruktionsschritten

Arbeitsschritt, wird notwendig, wenn die Ergebnisse des aktuellen Arbeitsschritts nicht befriedigend sind und auf Ergebnissen vorgelagerter Schritte beruhen. So können sich im Extremfall Mängel im Produktkonzept in Phasen der Konstruktion auswirken, wenn das gewählte Wirkprinzip einen nicht zulässigen Bauraum erfordert.

Durch die Ergänzung des oben beschriebenen Hauptansatzes zur Rationalisierung, s. Abb. 16.4, durch die in Abb. 16.5 dargestellten drei Punkte können sowohl der Ressourcen- als auch der Zeitaufwand für ein Projekt reduziert werden. Um aber insbesondere die „Time to Market“ zu reduzieren, also die Dauer von der Produktidee bis zur ersten Markapräsenz eines Produktes, muss häufig zusätzlich der oben dargestellte serielle Prozess in einen parallelen Prozess umgewandelt werden. Das bedeutet nichts anderes als die möglichst gleichzeitige und damit parallele Bearbeitung aller erforderlichen Entwicklungs- und Konstruktionsarbeitsschritte (Simultaneous Engineering). In Abb. 16.6 ist der allgemeine Entwicklungs- und Konstruktionsprozess mit parallelen Arbeitsschritten wiedergegeben.

Die Zeitachse in der Abbildung liegt senkrecht zu den Konstruktionsschritten. Die Säulen für die Modell-, Methoden- und Datenebene sind hier nicht bezogen auf die Zeitachse zu verstehen. Vielmehr soll dargestellt werden, dass die Verarbeitung dieser drei Größen in einem definierten Zeitrahmen stattfindet, der durch die Projektdauer vorgegeben wird.

Mit den bisherigen Überlegungen können also grundsätzlich der Ressourcenverbrauch und die Dauer eines Projekts reduziert werden. Dies sind ja die Ziele einer Rationalisierung.

Abbildung 16.6 verdeutlicht auch, woher der Rationalisierungseffekt bei der Verwendung bekannter bzw. vorhandener Komponenten u. a. röhrt. Für solche Elemente ist sowohl die Modell- als auch die Datenqualität typischerweise deutlich besser als dies bei Neuentwicklungen und Neukonstruktionen der Fall sein kann. So steigt die Wahrscheinlichkeit, die innere und die äußere Iteration vermeiden zu können.

Damit die oben beschriebenen grundsätzlichen Rationalisierungsansätze umgesetzt werden können, sind vier Forderungen zu erfüllen, die sich sowohl auf das Produkt und seine Komponenten, wie auch auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess mit seinen Arbeitsschritten beziehen:

**Forderung 1:** Die Eigenschaften des Systems, seiner Subsysteme sowie Systemelemente müssen für jeden Prozessschritt exakt und eindeutig modellierbar sein.

**Forderung 2:** Die Subsysteme sowie Systemelemente müssen unabhängig voneinander beschreibbar und entwickelbar sein.

**Forderung 3:** Die Schnittstellen zwischen den Prozessschritten müssen exakt und eindeutig definiert sein.

**Forderung 4:** Die Prozessschritte müssen unabhängig voneinander sein.

Die Forderungen verdeutlichen nochmals, dass Rationalisierungsansätze sich sowohl auf das Produkt, als auch auf den Prozess zu seiner Entstehung beziehen müssen. Im Folgenden wird gezeigt, dass häufig beide Aspekte sehr eng miteinander zusammenhängen und deshalb nicht einzeln betrachtet werden dürfen. Welche Hilfsmittel, insbesondere rechnerbasierte, zur Unterstützung der Maßnahmen verwendet werden, hängt wiederum sehr stark von den Maßnahmen selbst ab. Wäre es beispielsweise möglich, mit nur einem Produkt über viele Jahre am Markt zu bestehen, so wäre die Nutzung von CAD nicht notwendig. Im Weiteren werden allerdings Maßnahmen vorgestellt, die ohne Rechnereinsatz nicht oder nur schwierig umzusetzen sind.

Im Folgenden werden einige Ansätze zur Rationalisierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses vorgestellt. Sie beruhen alle in verschieden starker Ausprägung auf den oben dargestellten grundsätzlichen Ansätzen und Forderungen. Bei der hier gegebenen Darstellung der Ansätze geht es darum, sie möglichst anschaulich zu beschreiben und ihre Hauptkomponenten zu erläutern. Eine ausführliche Darstellung würde den gegebenen Rahmen dieses Buches überschreiten.

## 16.2 Methode des integrierten Wissensmanagements zur Rationalisierung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Im Folgenden soll eine Methode zur Rationalisierung der Entwicklung und Konstruktion vorgestellt werden, die die vom Markt geforderten Produktvarianten ermöglicht, ohne dabei die Forderungen der Rationalisierung zu verletzen. Sie lässt auch Strategien wie das „Design to Customer“, also die Realisierung möglichst kundenindividueller Produkte zu.

Diese Methode basiert im Wesentlichen auf drei Komponenten:

1. Produktfeatures: Sie stellen die in Abb. 16.4 aufgeführten „vorgedachten Produktelemente“ dar.
2. Wissen: Dieses ist über entsprechende Methoden an die Produktfeatures gebunden.
3. Digitales Produkt: Eine wesentliche Voraussetzung dieser Methode ist die durchgängige Nutzung der digitalen Daten, wie sie bei der rechnerunterstützten Entwicklung und Konstruktion von Produkten entstehen.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Umsetzung der Methode ist die Nutzung von Produktionsmaschinen, die die Daten aus der digitalen Produktdefinition direkt verarbeiten können. Diese Methode wird auch als CAD-CAM-Kopplung bezeichnet (Anderl und Grabowski 2011).

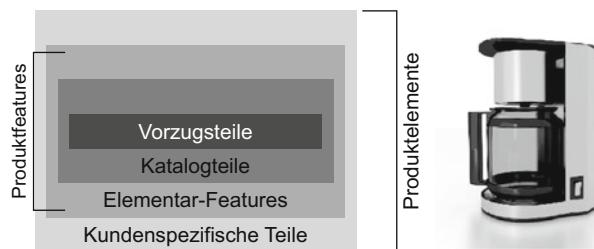
Wegen der im Sinne eines „Design to Customer“ kleinen Stückzahlen und der erforderlichen kurzen Zeiten zur Produkterstellung sind aber typischerweise auch zusätzlich spezielle Produktionstechniken notwendig. Hiermit sind Verfahren zum Rapid Manufacturing, wie z. B. das Rapid Prototyping, wie es in Teil 1, Abschn. 3.2.2 dargestellt ist, oder das Rapid Tooling gemeint.

### 16.2.1 Produktfeatures

Bei der hier vorgestellten Methode bilden Produktfeatures die „vorgedachten Produktelemente“ nach Abb. 16.4. Es sind also die Elemente, aus denen das Produkt im Rahmen des Konstruktionsprozesses zusammengesetzt wird. Features sind Objekte, die zur Beschreibung der geometrischen und zusätzlichen, nichtgeometrischen Eigenschaften von Produkten, Baugruppen, Einzelteilen und Gestaltzonen dienen (Ehrlenspiel 2009). Bei den im Rahmen dieser Methode verwendeten Features kann es sich grundsätzlich um materielle Elemente, wie z. B. mechanische oder elektronische Bauteile, oder Ausschnitte von diesen handeln oder um immaterielle wie Software. Diese werden hier als „Produktfeatures“ bezeichnet.

Der Featurebegriff soll für diese Methode weiter spezifiziert werden. Wie bei der Begriffsbestimmung erwähnt, beinhalten Features nicht nur die Beschreibung einer Geometrie. Vielmehr werden an diese Information weitere Daten und weiteres Wissen gekoppelt, beispielsweise welche Werkzeuge zur Erzeugung der durch das Feature beschriebenen Geometrie benötigt werden. Im Falle einer Schraube, die als Bauteilfeature betrachtet wird,

**Abb. 16.7** Elemente, aus denen Produkte nach der Methode des integrierten Wissensmanagements konstruiert werden

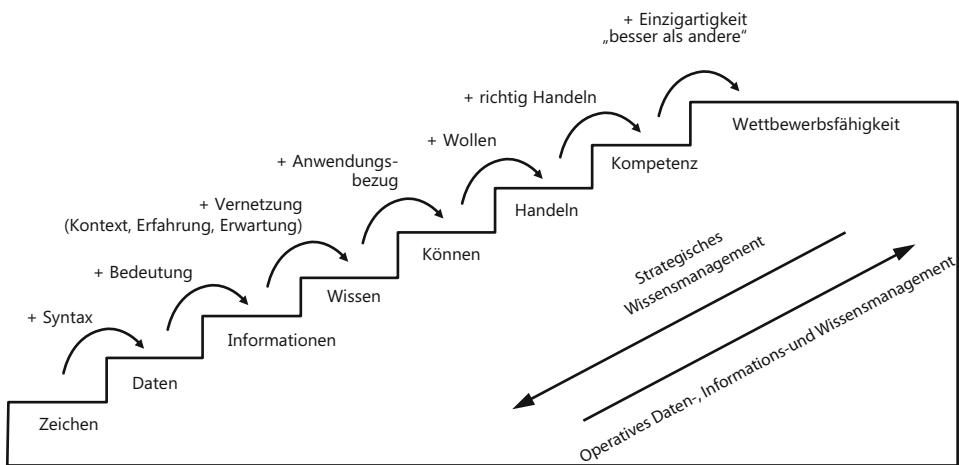


können diese Informationen, z. B. die Kosten und Lieferzeit und weitere nicht geometrischen Informationen, und Daten mit beinhalten. Alles benötigte Wissen über ein Feature und seine Eigenschaften wird in jeder Phase des Produktentstehungsprozesses an dieses Feature gebunden, wie weiter unten dargestellt. Ein Feature in diesem Sinne beinhaltet also alle notwendigen Daten, Informationen und Wissen über seine Geometrie und seine Anwendung in einem gegebenen Kontext.

Die Produktelelemente, aus denen ein Produkt besteht, teilen sich nach der hier vorgestellten Methode in die Produktfeatures und die kundenspezifischen Teile, s. Abb. 16.7.

Aufgrund der oben gemachten Ausführungen sind kundenspezifische Teile als Lösung einer Konstruktionsaufgabe keine Features. Über sie sind zwar die Anforderungen bekannt und die Schnittstellen, in die sie eingebunden werden sollen. Die wesentlichen Informationen und Daten, die im Produktentstehungsprozess über sie benötigt werden, entstehen aber erst im Rahmen ihrer Entwicklung und Konstruktion. Sie sind nicht standardisiert und nicht im Lösungspotential des Unternehmens vorhanden. Bei den in Abb. 16.7 aufgeführten Elementen handelt es sich bei dreien entsprechend dieser Methode um Produktfeatures:

1. **Vorzugsteile:** Dies sind Bauteile oder Baugruppen, die vom Unternehmen entwickelt und konstruiert werden. Ihr Funktionsumfang sowie die Gestaltung ihrer Geometrie und ihrer Schnittstellen kann vom Unternehmen in vollem Umfang festgelegt werden. Sie können im eigenen Unternehmen hergestellt oder bezogen werden. An diese Features können beispielsweise Fertigung- oder Kosteninformationen gekoppelt werden.
2. **Katalogteile:** Hierbei handelt es sich um vorhandene Lösungen, z. B. in Form von Bauteilen oder Baugruppen. Ihr Funktionsumfang und die Gestaltung ihrer Geometrie sowie ihrer Schnittstellen werden nicht durch das Unternehmen festgelegt. Sie werden grundsätzlich zugekauft. Typische an diese Features gekoppelte Informationen wären Angaben zu den Schnittstellen, der Montage usw.
3. **Elementar-Features:** Es ist die kleinste, nicht frei gestaltbare Einheit eines Produkts. Es kann sich dabei um Software, Elektronik-/Elektrikelemente oder mechanische Bauteile handeln. Die Ausprägung der Elementar-Features wird durch das Unternehmen festgelegt. Elementar-Features sind z. B. Geometrieelemente, wie Radien oder Fasen, wie sie beispielsweise auch in CAD-Systemen verwendet werden. Ein Elementar-



**Abb. 16.8** Wissenstreppe nach North (2002)

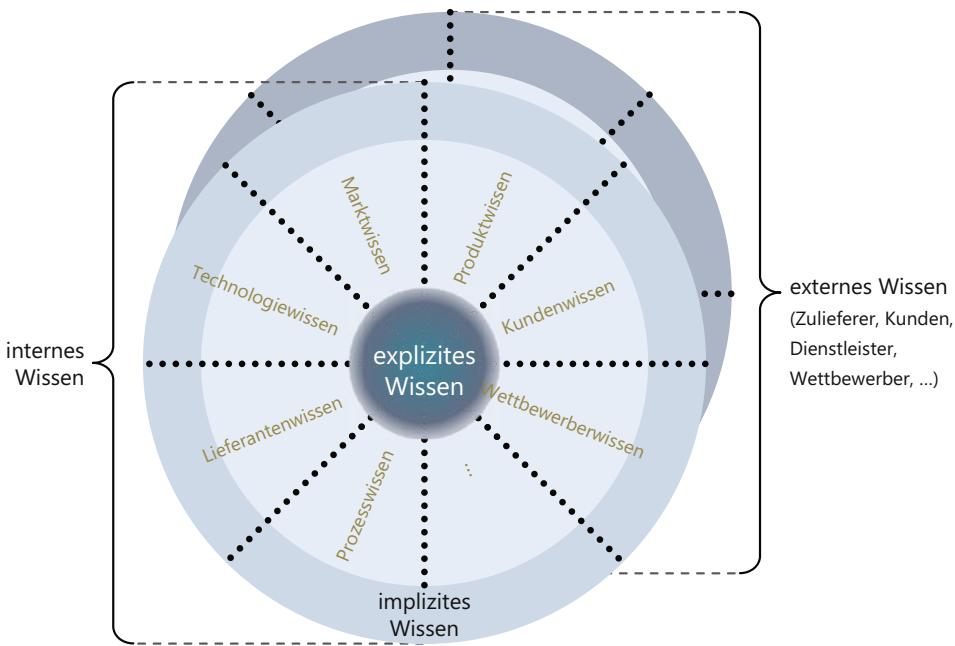
Feature der in Abb. 16.7 dargestellten Kaffeemaschine könnte z. B. eine Ecke des oberen Gehäuses bilden. Für sie gelten bestimmte Gestaltungsregeln für die Kantenradien und die Neigungswinkel der anschließenden Gehäusewände sowie minimale und maximale Wanddicken. Diese Informationen und Daten würden beispielsweise an das Elementar-Feature „Gehäuseecke – Kunststoff“ gebunden werden.

Die Produktfeatures werden vom Unternehmen so festgelegt, dass sie ein Optimum hinsichtlich der Technologie, hier insbesondere des Herstellungsprozesses, der Funktionserfüllung und der Kosten darstellen. Vereinfachend ausgedrückt wird ein Produkt nach dieser Methode wenn möglich aus den Produktfeatures zusammengesetzt, also konstruiert, die für das anwendende Unternehmen den besten Kompromiss hinsichtlich funktionaler und kostentechnischer Gesichtspunkte bilden. Wenn der Markt es erfordert, müssen auch kundenindividuelle Teile vorgesehen werden.

### 16.2.2 Produktwissen

Beim Entwicklungs- und Konstruktionsprozess handelt es sich um einen Informations- und Wissensmanagementprozess. Ohne konkrete Daten, Informationen und das Wissen, wie diese angewendet werden müssen, kann ein Produkt nicht entwickelt und konstruiert werden. In Abb. 16.8 ist die Wissenstreppe nach North (North 2002) wiedergegeben. Sie stellt ein Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen einzelnen Wissensstufen dar.

Um die in Abschn. 16.2.1 aufgeführten Elemente im Rahmen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses im Produkt richtig anwenden zu können, ist umfangreiches Wissen über die Elemente selbst und den Anwendungskontext notwendig. An jedes Produktfeature ist also eine Reihe von Wissensarten gebunden, wie sie in Abb. 16.9 wiedergegeben sind.



**Abb. 16.9** Wissensarten (Bungert 2009)

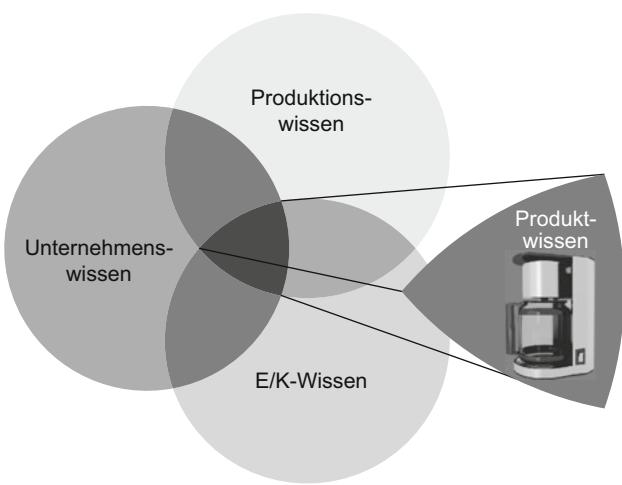
Das verwendete Wissen kann nicht nur aus dem eigenen Unternehmen stammen, sondern auch aus externen Quellen wie Zulieferern, Dienstleistern usw.

Es muss bekannt sein, unter welchen Bedingungen ein Element wo und in welcher Kombination mit anderen Elementen verwendet werden darf. Dieses Wissen muss also an die Produktfeatures gebunden werden. Da die hier vorgestellte Methodik u. a. auf einer durchgehenden Rechnerunterstützung basiert, wird das notwendige Wissen sinnvollerweise durch entsprechende IT-Prozeduren an die Produktfeatures gebunden. Darauf wird unten im Abschnitt 16.4.4 eingegangen.

Im Grunde handelt es sich bei diesem Ansatz um ein Konfigurationsmanagementsystem, wie es weiter hinten im Abschn. 16.3 dargestellt wird, nur für Features. Es wird also auch hier im übertragenen Sinn eine Verträglichkeitsmatrix benötigt. Sie beinhaltet hier aber Wissen, welches benötigt wird, um die Features verträglich zu einem Bauteil, einer Baugruppe oder einem Produkt kombinieren zu können. Wie in Abb. 16.10 dargestellt, kann das an die Features gebundene Wissen grundsätzlich in drei Gruppen eingeteilt werden, s. auch Abb. 16.9:

1. Das Unternehmenswissen: Hierbei handelt es sich um die Abbildung der Einflüsse von Unternehmensgegebenheiten auf die Produktgestaltung. Ein Beispiel wäre die Make-or-Buy-Strategie des Unternehmens, also die Festlegung, welche Bauteile oder Baugruppen grundsätzlich selbst hergestellt, bzw. eingekauft werden.
2. Das Entwicklungs- und Konstruktionswissen: Es umfasst alle Daten und Informationen über die Eigenschaften der Features und die Regeln ihrer Kombinierbarkeit. Dabei

**Abb. 16.10** Die drei grundsätzlichen Wissensbereiche für die Produktentstehung



werden die jeweiligen Rahmenbedingungen für die einzelnen Lebensabschnitte des Produkts berücksichtigt.

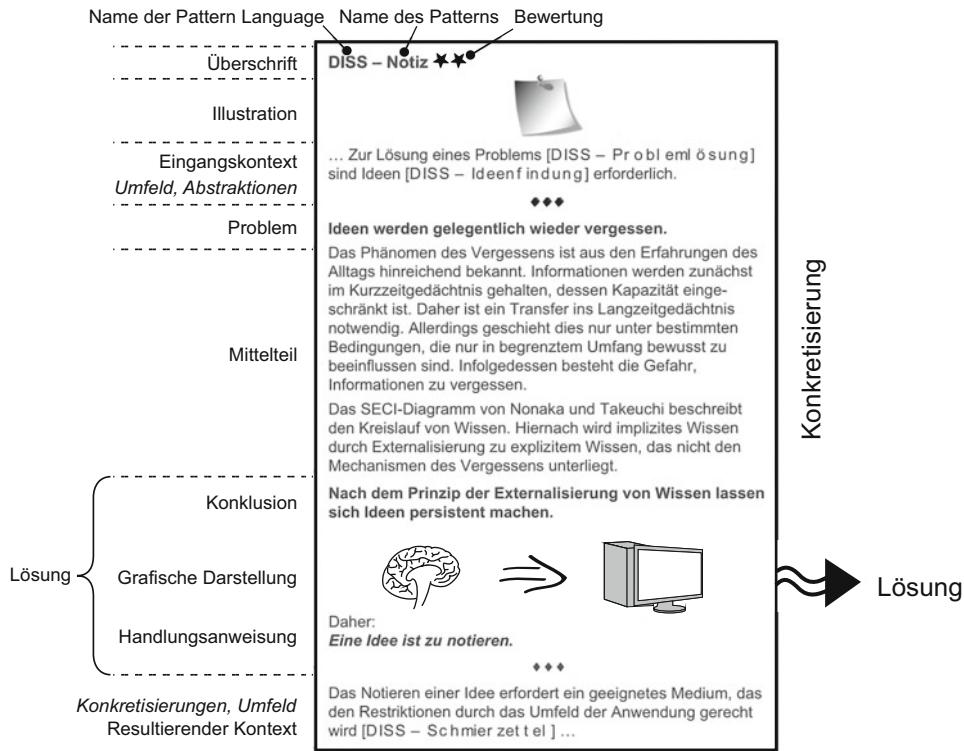
3. Das Produktionswissen: Es beinhaltet neben den Daten und Informationen zur Herstellbarkeit von Features und den zu beachtenden Rahmenbedingungen auch Daten zu Kosten.

In der Theorie und Praxis gibt es verschiedene Möglichkeiten, Wissen abzubilden und an Konstruktionselemente zu binden. Als sehr vielversprechend hat sich in den letzten Jahren die Pattern Language gezeigt. Sie wurde in der Architektur entwickelt (Alexander et al. 1977) und fand sehr schnell Eingang in die Informatik. In Bungert (2009) findet sich eine umfangreiche Darstellung, wie die Pattern Language im hier behandelten Sinn angewendet werden kann. Abb. 16.11 zeigt die Struktur eines Pattern.

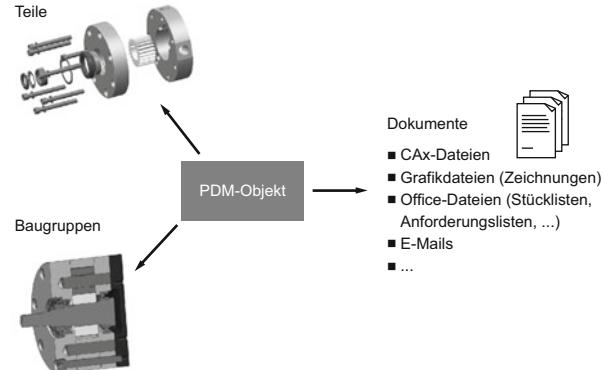
Solche Strukturen wie die Pattern können z. B. mittels eines Produktdatenmanagementsystems an die Produktfeatures gebunden werden.

### 16.2.3 Digitales Produkt

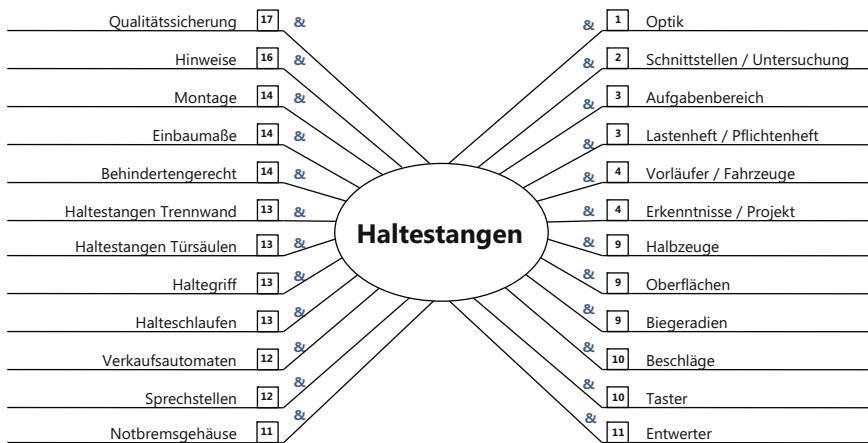
Ein weiterer wesentlicher Aspekt dieser Methode besteht in einer durchgängigen Nutzung der digitalen Produktdaten, wie sie bei der Nutzung von CAx-Systemen erzeugt werden, im gesamten Produktentstehungsprozess (PEP). Wie Abb. 16.9 verdeutlicht, handelt es sich dabei nicht nur um Geometriedaten der Produktfeatures. Zusätzlich wird an diese Objekte der Entwicklung und Konstruktion über deren Geometriedaten hinaus weiteres Produkt- bzw. Objektwissen gebunden. Diese Verknüpfung zwischen den Daten und den zugehörigen Objektinformationen und -wissen erfolgt heute meistens mithilfe eines rechnerinternen Produktdatenmodells, das z. B. in einem Produktdatenmanagement-System (PDM-System)

**Abb. 16.11** Struktur eines Pattern

**Abb. 16.12** Vereinfachte Darstellung eines Produktdatenmodells, wie es als PDM-Objekt in einem PDM-System gespeichert ist



gespeichert wird (Feldhusen und Gebhardt 2007). In Abb. 16.12 ist ein Produktdatenmodell vereinfacht dargestellt. In diesem Beispiel ist es als Objekt in einem PDM-System gespeichert. Wie zu erkennen ist, werden alle relevanten Daten und Informationen eines Objekts, hier die Produktfeatures, durch die Funktionalitäten des PDM-Systems an sie gekoppelt.

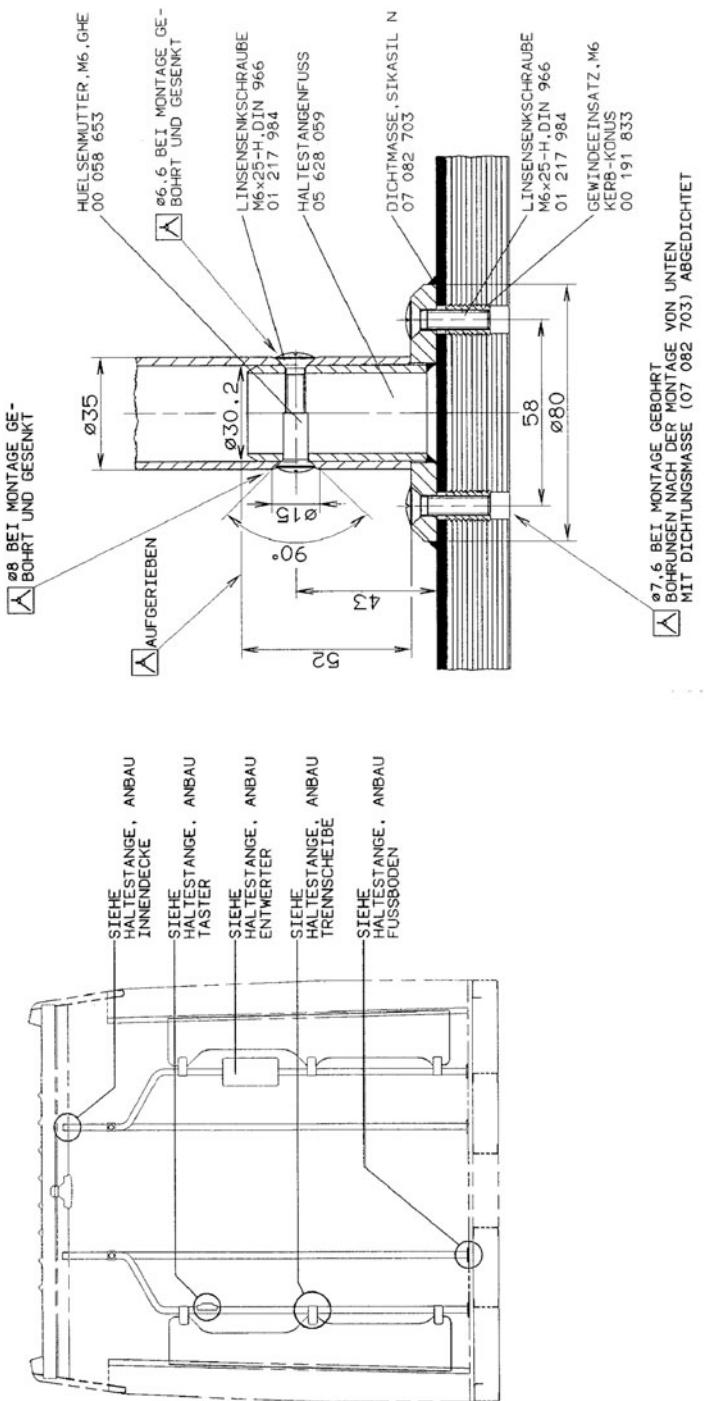


**Abb. 16.13** Kontextdiagramm für Haltestangen

In Abb. 16.12 sind alternativ eine Baugruppe und einzelne Bauteile als PDM-Objekte wiedergegeben. Dabei ist zu beachten, dass eine Baugruppe gegenüber einem Einzelteil noch eine Reihe weiterer Informationen enthält, wie beispielsweise die Positionsnummern der Bauteile, aus denen sie besteht, und deren Ausrichtung zueinander.

#### 16.2.4 Die Komponenten zur Umsetzung der Methode des integrierten Wissensmanagements

Wie ein Produkt nach der hier vorgestellten Methode konstruiert wird, wurde in den oberen Abschnitten bereits dargelegt. Das Produkt wird quasi aus den vorhandenen Elementen „Vorzugsteile“, „Katalogteile“, „Elementar-Features“ und „kundenspezifische Teile“ zusammengesetzt. Wie hierbei vorgegangen werden kann, soll an einem einfachen Beispiel gezeigt werden. Dabei handelt es sich um den Einbau von Haltestangen in einem Straßenbahnfahrzeug. Dieser ist deshalb so komplex, weil es sich sowohl aufgrund der Abmessungen, als auch wegen der Teileanzahl um eine sehr große Baugruppe handelt. Ihre Einzelteile, die Haltestangen und Verbindungskloben, sind nicht nur untereinander verbunden, vielmehr haben sie Schnittstellen zum Wagenkasten, und es sind diverse Geräte an ihnen befestigt, wie z. B. der Fahrkartenausdruck, Anzeigentafeln usw. Die Schnittstellengestaltung einer Haltestange ist deshalb sehr kontextabhängig. Die Klärung des Einsatzkontextes ist also der erste zu klärende Punkt bei der Konstruktion. In dem Beispiel erfolgt dies mithilfe des in Abb. 16.13 dargestellten Kontextdiagramms. Durch dieses Diagramm wird der Anwendungs- und damit der Lösungsbereich festgelegt und eingeschränkt. Jeder der in Abb. 16.13 aufgeführten Kontextbegriffe ist mit einem Wissensspeicher verbunden. Er beinhaltet neben den Lösungen selbst u. a. auch Anwendungsregeln für diese Lösungen. In Abb. 16.14 ist auf der linken Seite eine bildliche Kontextdarstellung für



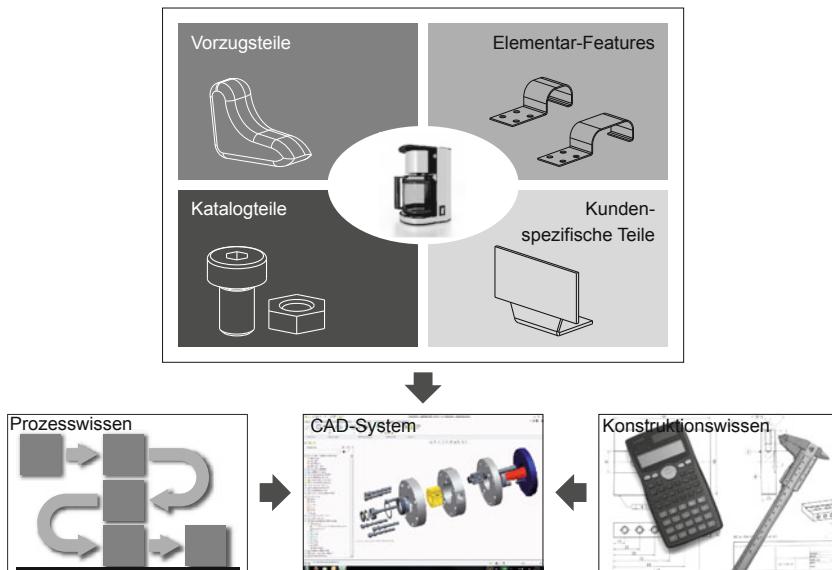
typische Einbausituationen einer Haltestangenbaugruppe in Straßenbahnen wiedergegeben. Sie stellt einen typischen Wagenquerschnitt dar, in dem die möglichen Ein- und Anbausituationen, also der jeweilige Anwendungskontext, einer Haltestange dargestellt ist.

In der Abbildung ist die hier konkret betrachtete Einbausituation durch einen gestrichelten Kreis kenntlich gemacht. Es geht dabei um die Befestigung von Haltestangen am Fußboden des Fahrzeugs. Im Vorfeld wurde die Art des Fußbodenauflaus bereits erklärt. Für die Befestigung einer Haltestange am Fußboden gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, und es gehört zu dieser Befestigung eine Reihe von Bauteilen. Diese müssen im Rahmen des Konstruktionsprozesses festgelegt und in ihre Umgebung, hier fußbodenseitiges Haltestangenende und Fußboden, integriert werden. Mit den Informationen zum Anwendungskontext und dem für den Fußboden eingesetzten Material und Aufbau kann dann eine konkrete Konstruktionsanweisung in Form eines Produktfeatures angegeben werden. Es besteht in diesem Fall wiederum aus Katalog- und Vorzugsteilen. Ein Vorzugsteil stellt in diesem Beispiel der Befestigungsflansch zur Verschraubung auf dem Fußboden dar. Er wurde vom Unternehmen konstruiert und als Werksnormteil geführt. In Abb. 16.14 ist auf der rechten Seite die konkrete konstruktive Lösung als Baugruppenzeichnung wiedergegeben, wie sie aus dem in einem CAD-System erstellten Baugruppenmodell abgeleitet wurde. Wie bereits beschrieben, ist mit dem CAD-Modell, aus dem die Zeichnung ausgeleitet wurde, auch die Produktstückliste verbunden, in die die verwendeten Bauteile und Baugruppen übernommen werden.

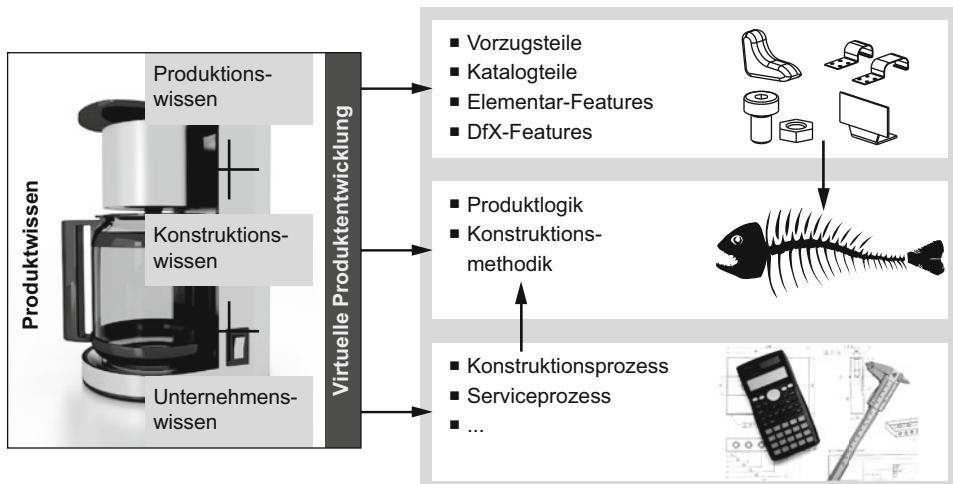
Kundenindividuelle Lösungen müssen im Rahmen eines konventionellen Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erarbeitet werden. Die Regeln, also das Wissen, nach denen das Produkt aus den Produktfeatures zusammengesetzt wird und wie kundenspezifische Lösungen hierin eingebunden werden, kann z. B. mithilfe des Produktdatenmodells in einem PDM-System gespeichert werden, s. auch Abb. 16.12. Die Elemente selbst werden mithilfe eines CAD-Systems modelliert. Das Vorgehensmodell oder der Prozess, also was in welcher Reihenfolge getan werden soll, wird heute üblicherweise in Form eines Workflows in einem PDM-System abgebildet. In Abb. 16.15 sind diese Zusammenhänge in vereinfachter Form wiedergegeben.

Einen sehr wichtigen Aspekt bei der Entwicklung und Konstruktion stellt die Produktstruktur dar. Da auf ihrer Basis die überwiegende Zahl der Vorgänge in einem Unternehmen geplant werden, insbesondere diejenigen der Fertigung, muss sie nach entsprechenden Kriterien, z. B. die Fertigungsabfolge, aufgestellt werden. Wegen des hohen Kosteneinflusses der Fertigung ist es deshalb sinnvoll, Standardproduktstrukturen vorzugeben. In Abb. 16.16 entspricht das dargestellte Fischskelett einer Standardproduktstruktur. Gespeichert wird sie üblicherweise in Form einer „leeren“ Strukturstückliste im ERP-System oder in einem PDM-System.

Ihre Entsprechung aufseiten der Geometrie wäre beispielsweise als parametrisches Skeleton im CAD-System gespeichert, s. Abb. 16.17. Dabei kann vom ERP-System die Produktstruktur entnommen werden.

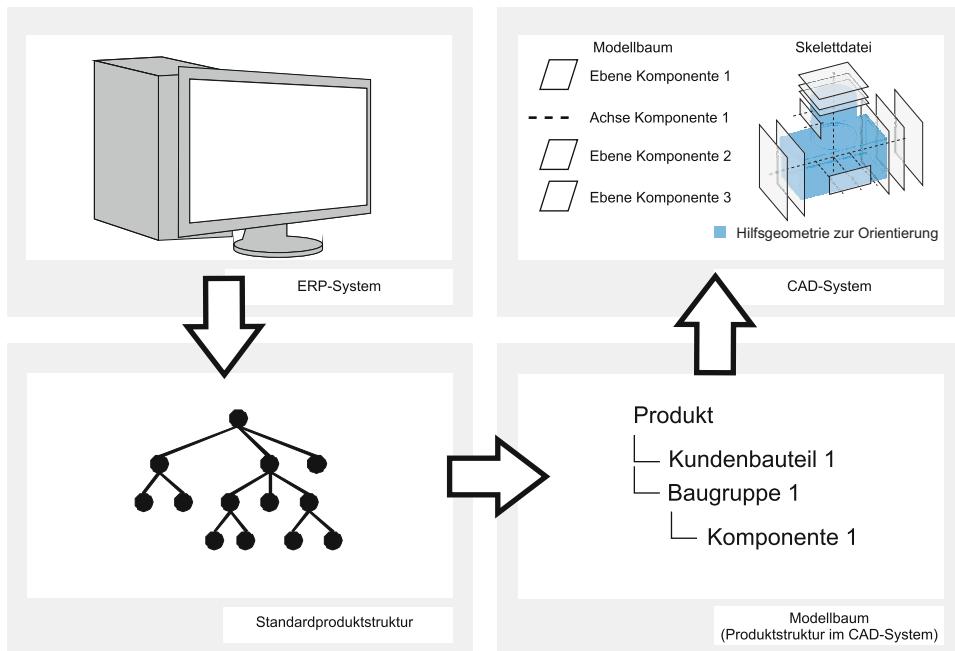


**Abb. 16.15** Komponenten zur Umsetzung der Methode des integrierten Wissensmanagements

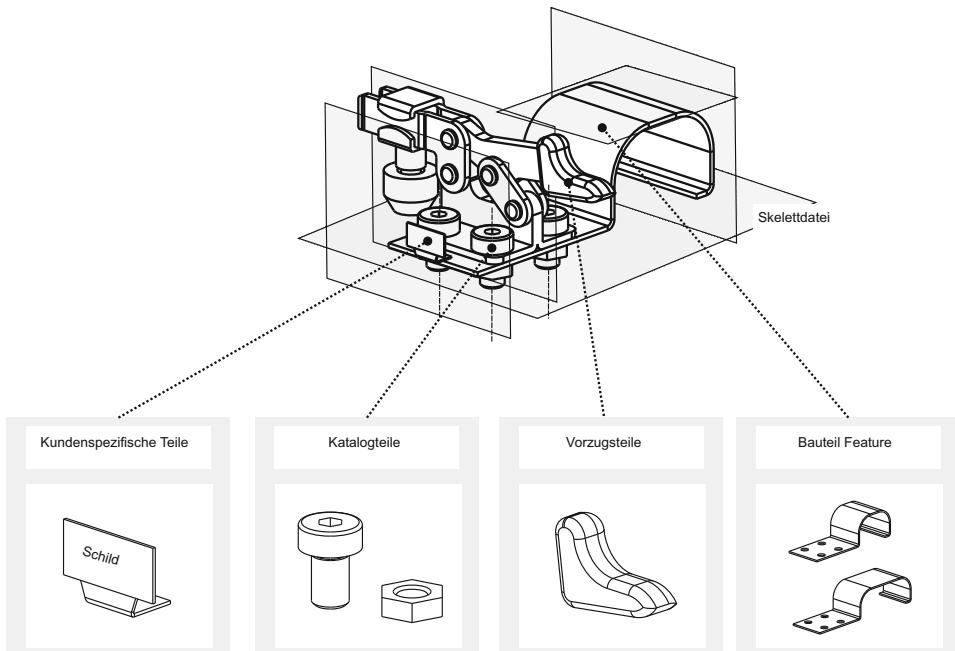


**Abb. 16.16** Wissensstruktur für die Methode des integrierten Wissensmanagements

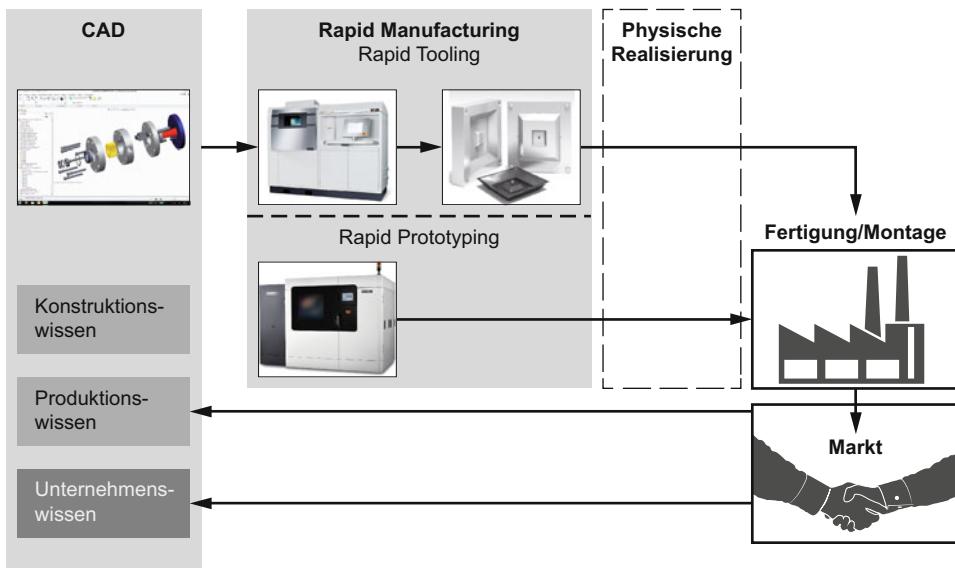
Diese beschreibt damit die geometrische Struktur von Elementen zueinander. Im Falle eines parametrischen Skeletts werden, wie bei einem parametrischen CAD-Modell auch, die geometrischen Beziehungen der Elemente untereinander als relative Beziehungen beschrieben. Wird also ein Hauptmaß festgelegt, ergeben sich die mit diesem relativ verknüpften Abmessungen automatisch. Wie in Abb. 16.18 erläutert, wird bei dem Vor-



**Abb. 16.17** Kopplung der Produktstruktur einer Referenzvariante mit einer parametrischen Skelettdatei



**Abb. 16.18** Zuordnen der Komponenten zu der Skelettdatei



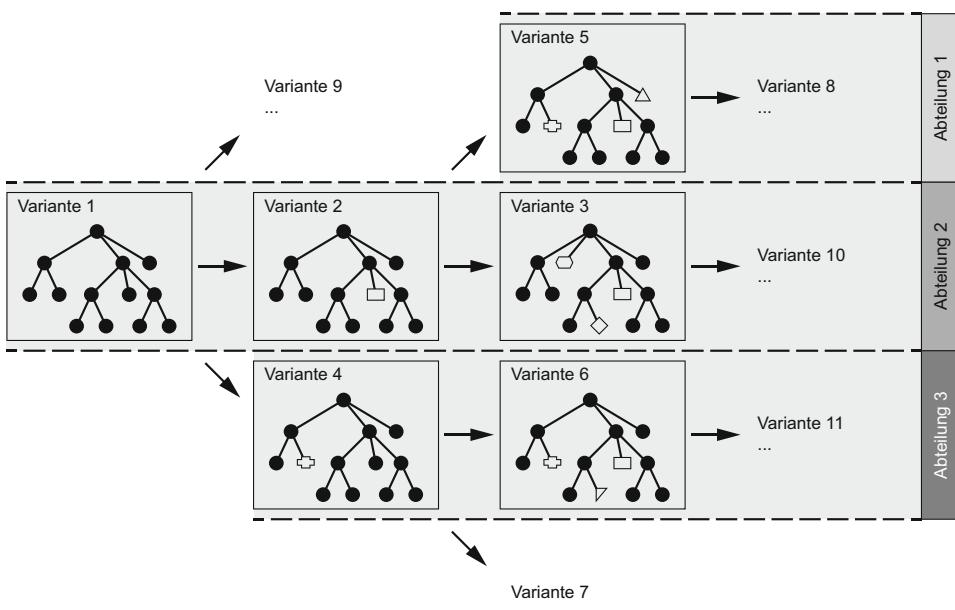
**Abb. 16.19** Produktentstehung nach der Methode des integrierten Wissensmanagements (EOS GmbH 2012; Stratasys 2012)

gehen nach der Methode des integrierten Wissensmanagements die Skelettdatei mit den Produktfeatures und evtl. kundenspezifischen Elementen aufgefüllt.

So entsteht ein Digital-Mockup, also ein digitales Abbild der Produktgeometrie, welches dann für die Produktion mittels entsprechender Fertigungsmaschinen genutzt wird, wie in Abb. 16.19 dargestellt.

Wie bereits erwähnt, ist ein wesentlicher Punkt hierbei die durchgängige Nutzung der bei der Konstruktion im CAD-System entstandenen digitalen Geometriedaten des Produkts. Diese werden zur Steuerung der entsprechenden Produktionsmaschinen zum Rapid Manufacturing genutzt, wie in der Mitte der Abbildung wiedergegeben. Beim Rapid Tooling beispielsweise werden insbesondere Werkzeuge für die Kleinserienherstellung von Kunststoffbauteilen produziert. Diese Werkzeuge werden statt aus hochfesten Werkstoffen häufig aus einfach zu bearbeitenden Aluminiumlegierungen gefertigt. Die geringe Lebensdauer der Werkzeuge wird dabei in Kauf genommen, da die produzierten Stückzahlen auch klein sind. Unter dem Rapid Prototyping wird hier neben der Bedeutung insbesondere die Herstellung von Komponenten verstanden, die im Kundenprodukt verwendet werden können. In Teil 1 Kap. 3.4 werden die Generativen Fertigungsverfahren ausführlich dargelegt.

Im Sinne eines „Lessons learned“ fließen die Erkenntnisse aus der Produktion möglichst direkt in die Konstruktionsunterlagen ein, wodurch eine ständige Optimierung der Produktfeatures möglich ist.



**Abb. 16.20** Variantenentstehung auf Basis von „Alt“-Produkten

### 16.3 Varianten- und Konfigurationsmanagement (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Wie bereits oben erläutert, besteht ein wesentlicher Ansatz zur Rationalisierung in der Verwendung bereits vorhandener Elemente. In der Praxis wird häufig so vorgegangen, dass versucht wird, bereits vorhandene Produktelemente, also Bauteile oder Baugruppen, die im Rahmen eines früheren Auftrags entstanden sind, möglichst auch für einen neuen Auftrag zu nutzen. Meistens ist aber eine gewisse Anpassung dieser Elemente an die neuen Gegebenheiten notwendig. So entstehen Produktvarianten, die im Unternehmen zu einer sehr großen Vielfalt führen, da z. B. wegen der notwendigen Ersatzteilversorgung die alten Varianten weiter gepflegt werden müssen, s. Abb. 16.20.

Dies führt in einem Unternehmen schnell zu einem „Wildwuchs“ an Varianten von Bauteilen, Baugruppen und Produkten, den es einzuschränken gilt. Dabei müssen natürlich die Bedingungen des Marktes und die Marktstrategie des Unternehmens berücksichtigt werden. Es geht also um eine bewusste Festlegung der Varianz hinsichtlich der Inhalte und der Anzahl der zu verwendenden Elemente.

Sinnvollerweise sollten hierbei nicht nur die Produkte und ihre Elemente, sondern auch der Produktentstehungsprozess (PEP) berücksichtigt werden. Der PEP besteht in der Praxis ja aus sehr vielen Teilprozessen. Deren Inhalte und Schnittstellen festzulegen führt zu Standardprozessen und hat ebenfalls einen hohen Rationalisierungseffekt. Ein erster und

wichtiger Schritt zur Umsetzung des in diesem Abschnitt behandelten Rationalisierungsansatzes ist also die Bestimmung, welche Elemente in welchen „Varianten“ verwendet werden sollen.

Nach DIN 199 T1 (2002) umfasst der Begriff „Variante“ Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit in der Regel hohem Anteil identischer Baugruppen oder Bauteile. Nach Franke et al. (2002) ist die Variante eines technischen Systems ein anderes technisches System gleichen Zwecks, das sich in mindestens einer Beziehung oder einem Element unterscheidet. Ein Element unterscheidet sich von einem anderen Element in mindestens einer Eigenschaft. Eine vertiefte Betrachtung des Variantenbegriffs findet sich u. a. auch in Bräutigam (2004).

Unkontrolliertes Entstehen von Varianten gilt es zu verhindern. Die Varianten eines Produktelements sollen so erzeugt werden, dass sie den oben dargestellten Zielen, geringe interne Vielfalt und hohe externe Vielfalt, genügen. Dieses gezielte Steuern der Varianz wird als Variantenmanagement bezeichnet. Es umfasst alle Steuerungsvorgänge zur Optimierung der Variantenvielfalt und zur Beherrschung variantenreicher Produktspektren (Franke et al. 2002). Eine eher produktionsorientierte Definition stellt folgende dar:

„Das Variantenmanagement ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Produktion sowie in der Logistik. Die Identifikation der vom Kunden wahrgenommenen Differenzierungsmerkmale stellt eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung eines marktgerechten Produktprogramms und damit zur Vermeidung unnötiger Produktvarianten dar. Plattformkonzepte, Baukastensysteme, Modularisierung und Standardisierung sind wesentliche Ansätze, Variantenvielfalt auf Baugruppen- und Teilebene im Rahmen einer variantenorientierten Produktgestaltung zu reduzieren und zu vermeiden“ (logistik 2012).

In dieser Definition wird die Bedeutung der Produktarten, z. B. Baukasten- oder Modulbauweise, für die Rationalisierung deutlich herausgestellt. Deshalb werden sie in Kap. 17 dieses Teils des Buches ausführlich behandelt.

Mit der Einführung eines Variantenmanagements nimmt ein Unternehmen eine bewusste Einschränkung der Produktvielfalt vor. Die Einschränkung der Varianz stellt aber noch nicht eine Kostenreduktion sicher. Es kann immer noch mögliche Kombinationen von Produktkomponenten geben, die unwirtschaftlich sind. Gleichzeitig muss auch sichergestellt sein, dass die ausgewählten Komponenten technisch optimal zusammenspielen. Beides ist Aufgabe des Konfigurationsmanagements. Für die Umsetzung eines Konfigurationsmanagements werden also folgende Komponenten benötigt:

- ein Speicher für zulässige Produktstrukturen,
- ein Speicher für vorhandene Komponenten wie Bausteine, Module, Features usw. und
- eine Abbildung der Zulässigkeitsregeln für die Kombination von Komponenten (Wissensspeicher).

Damit ergibt sich für ein Unternehmen zur Einführung des hier vorgestellten Ansatzes zur Rationalisierung folgende Reihenfolge: In einem ersten Schritt muss das Variantenmanage-

ment entwickelt und angewendet werden. Im Ergebnis stehen dann die im Unternehmen zu verwendenden Komponenten für die Produkte und den Produktentstehungsprozess und deren jeweilige Varianten fest. Dann werden mittels eines Konfigurationsmanagementsystems die zulässigen Kombinationen der Komponenten bestimmt, um technisch und wirtschaftlich optimale Kombinationen sicherzustellen. Das Variantenmanagement ist heute eine typische Aufgabe des Vertriebs, des Produktmanagements oder des Marketings. Dazu benötigen diese Bereiche natürlich die Unterstützung der Entwicklung und Konstruktion sowie der Fertigung. Im folgenden Kapitel wird eine Methode zum Aufbau eines Konfigurationsmanagementsystems vorgestellt. Sie berücksichtigt insbesondere die gemachten Überlegungen zur Varianz von Produktelelementen und zur Standardisierung.

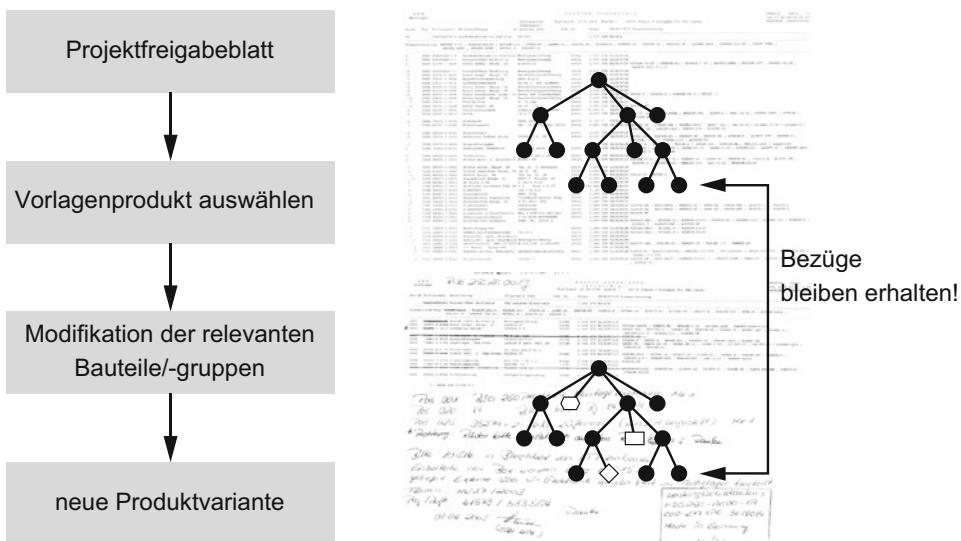
---

## 16.4 Das Referenzprodukt als Ansatz zur Rationalisierung (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

### 16.4.1 Die typische Ausgangssituation

Wie bereits zu Beginn dieses Buchteils beschrieben, entsteht Effizienz, als wesentliche Voraussetzung zur Rationalisierung, insbesondere durch die Nutzung von bereits Vorhandenem. Dieser Ansatz wird insbesondere im Anlagenbau genutzt, aber auch sonst, wo der Markt mit mehr oder weniger großen Abwandlungen vorhandener Produkte bedient werden kann. Meistens wird dabei so vorgegangen, dass nach erhaltenem Auftrag geprüft wird, welches bereits in der Vergangenheit gelieferte Produkt den größten Gleichheitsgrad mit dem neu bestellten hat. Diese Prüfung erfolgt sinnvollerweise auf Basis der Strukturstückliste des „Alt“-Produkts. Es wird dabei untersucht, welche seiner Baugruppen und Bauteile ohne Veränderungen für den neuen Auftrag übernommen werden können, welche einer Modifikation bedürfen und welche entfallen bzw. zusätzlich neu entwickelt und konstruiert werden müssen. Dieser Vorgang ist stark vereinfacht in Abb. 16.21 dargestellt. Symbolhaft ist dabei auf der rechten Seite oben die Strukturstückliste des Ausgangsprodukts wiedergegeben. Auf der rechten Seite unten symbolisieren die von Hand in der Stückliste eingetragenen Änderungen die notwendigen Anpassungen. In der Praxis wird dieser Vorgang, nach entsprechenden vorbereitenden Arbeiten, im rechnerunterstützen Stücklisten-System vorgenommen. Unter einer neuen Ident-Nummer für das Gesamtprodukt wird eine Kopie der Stückliste des Vorlagenprodukts erzeugt. In dieser werden nicht zu verwendende Bauteile und Baugruppen gelöscht. Müssen vorhandene Baugruppen modifiziert werden, so bekommen sie eine neue Ident-Nummer. Solche Baugruppen sollen die transparenten Formelemente in Abb. 16.21 rechts unten darstellen.

Auf diese Weise bleiben der Bezug, die Referenzierung, der im neuen Produkt verwendeten Baugruppen und Bauteile zum Vorlagenprodukt erhalten. Hätte eine zunächst unverändert übernommene Baugruppe keinen Bezug zu ihrem Ursprung, so könnte sie geändert werden, ohne ihre ursprüngliche Verwendung in bereits gelieferten Produkten



**Abb. 16.21** Vereinfachter Prozess zur Anpassung eines Vorlagenprodukts auf Basis der Strukturstückliste

zu berücksichtigen. Das würde z. B. dazu führen, dass keine Ersatzteile mehr für bereits gelieferte Produkte verfügbar wären, da nun unter derselben Ident-Nummer eine andere Baugruppe gefertigt würde.

#### 16.4.2 Die Referenzproduktstruktur

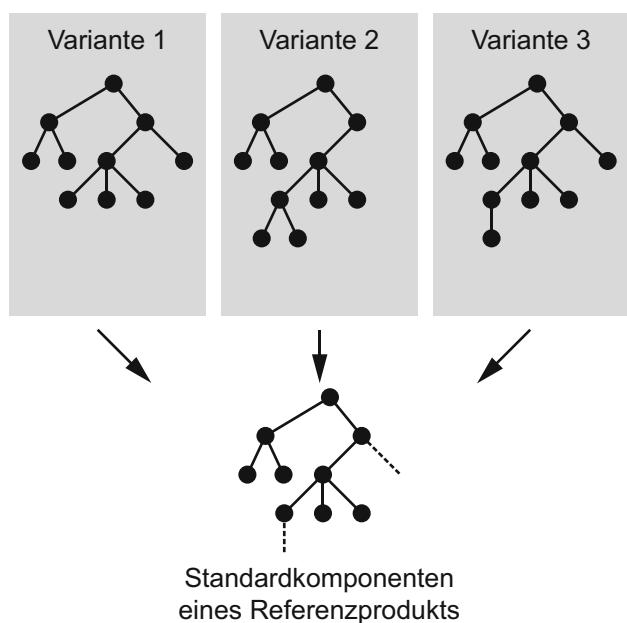
Bei dem hier vorgestellten Ansatz geht es darum, die oben beschriebene und in vielen Teilen der Industrie weit verbreitete Vorgehensweise zu systematisieren und zu formalisieren. Unter einer Referenzproduktstruktur wird Folgendes verstanden (Nurcahya 2009):

„Die größtmögliche Produktstruktur, die für sämtliche Produktvarianten in einer bestimmten Produktgruppe verwendet werden kann. Jeder Knoten in einer Referenzproduktstruktur dient als Platzhalter für bestimmte Bauteil und Baugruppenvarianten gleicher Klassifikation. Die Knoten müssen dabei nicht bei jeder Produktvariante verwendet werden. Bei den Knoten kann es sich entweder um einen Standard, eine Option oder eine kundenindividuelle Variante eines Bauteils oder Baugruppe handeln.“

In Abb. 16.22 ist die Bildung einer Referenzproduktstruktur aus den Produktstrukturen einer Produktgruppe wiedergegeben.

Das Referenzprodukt ist ein Bezugsprodukt, das für die Neuerstellung einer Produktvariante durch die Änderung relevanter Bauteile/-gruppen verwendet wird. Es kann sich um ein statisches Referenzprodukt handeln, von dem alle Produktvarianten innerhalb einer Produktfamilie abgeleitet werden. Es kann sich aber auch um ein dynamisches, projektorientiertes Referenzprodukt handeln. Letzteres wird nur als Referenzprodukt innerhalb eines bestimmten Projekts verwendet.

**Abb. 16.22** Bildung einer Referenzproduktstruktur aus den Produktstrukturen einer Produktgruppe



Nach Nurcahya bildet die Referenzproduktstruktur nicht die Struktur eines bestimmten Referenzprodukts ab, sondern die Struktur sämtlicher Produkte innerhalb einer Produktgruppe.

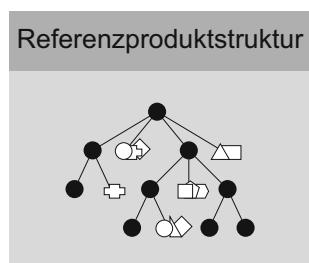
Ein Standard eines Referenzprodukts, schwarze Punkte in Abb. 16.22, ist eine Baugruppe oder ein Bauteil, das in allen Varianten des Produkts unverändert verbaut wird. Bei Optionen handelt es sich um Varianten von Baugruppen, die vollständig entwickelt, konstruiert und dokumentiert sind und an definierten Stellen des Abb. 16.22 als gestrichelte Linien dargestellt sind. Um kundenindividuelle Varianten zu erzeugen, müssen entsprechend für einen Auftrag konstruierte Produktkomponenten in diese integriert werden.

Wie in der Definition des Referenzprodukts beschrieben, ist im Normalfall für jede Produktgruppe eines Unternehmens ein Referenzprodukt notwendig. Häufig können aber auch innerhalb einer Produktgruppe mehrere Referenzprodukte erforderlich sein, damit die Variantenbildung auf Basis eines Referenzprodukts nicht unnötig komplex wird.

Die gewünschte Rationalisierung im Unternehmen bei Einsatz eines Referenzprodukts entsteht durch folgende Schritte und betrifft nicht nur die Entwicklung und Konstruktion, sondern alle Bereiche, s. auch Abb. 16.22:

1. Das Unternehmen muss für eine Produktgruppe bewusst eine Produktstruktur festlegen: Durch die Festlegung auf eine Produktstruktur und deren Verankerung im ERP-System (Enterprise-Resource-Planning-System) des Unternehmens werden auch die zur Erstellung des Produkts notwendigen Abläufe und Prozesse weitgehend festgelegt.

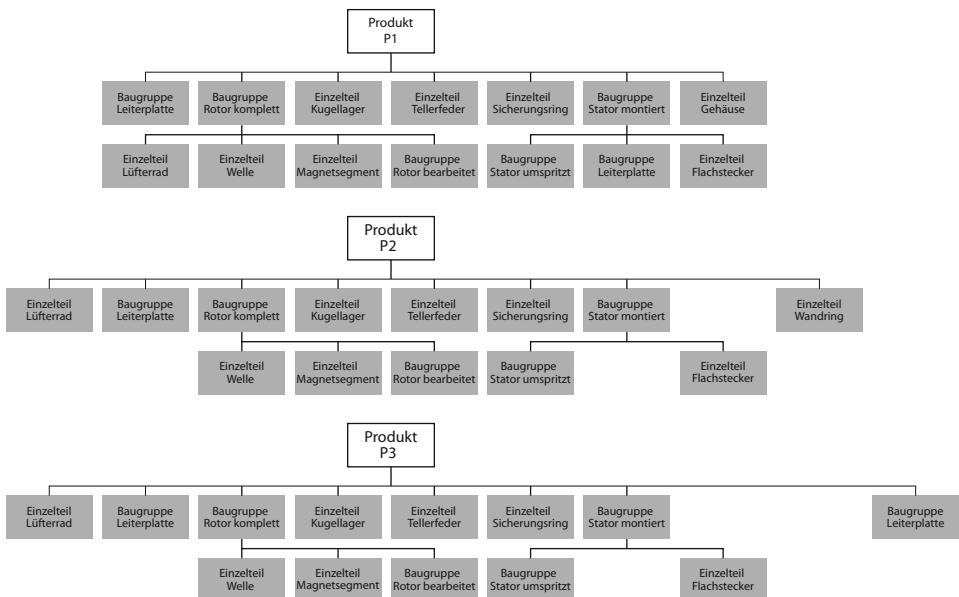
**Abb. 16.23** Symbolische Darstellung der Referenzproduktstruktur einer Produktgruppe (Nurcahya 2009)



2. Die zulässige Varianz des Produkts muss festgelegt werden: Das Unternehmen muss sich für eine Marktstrategie bewusst entscheiden und diese mit Hilfe der Produktstruktur des Referenzprodukts verankern. Für jeden Knoten wird also definiert, ob es sich um einen Standard, eine Option oder eine kundenindividuelle Variante handelt.
3. Das Unternehmen muss Lösungen für Standards, Optionen und die Schnittstellen für kundenindividuelle Anpassungen entwickeln: Hierdurch entsteht zwangsläufig ein Standardisierungseffekt, insbesondere durch eine bewusste Beschränkung der Anzahl von Optionen. Die Anzahl „freier Schnittstellen“, durch die kundenindividuelle Lösungen in das Referenzprodukt integriert werden können, muss ebenfalls beschränkt und die Konfiguration dieser Schnittstelle genau festgelegt sein. Andernfalls würde der Standardisierungseffekt aufgehoben werden.
4. Für die Erstellung des Referenzprodukts und seiner Komponenten muss das Unternehmen die notwendigen Prozesse standardisieren und dokumentieren: Für jedes Referenzprodukt kann ein zugehöriger Referenzprozess festgelegt werden. Seine Teilprozesse, wie z. B. die Beschaffung, Arbeitsplanung, Fertigung von Komponenten usw., und die Schnittstellen zwischen den Teilprozessen können ebenfalls dokumentiert und gespeichert werden, beispielsweise mit Hilfe eines PDM- oder ERP-Systems.
5. Die für das Referenzprodukt definierten Lösungen und der zugehörige Referenzprozess müssen vollständig dokumentiert werden: Bei der Erstellung eines Produkts auf Grundlage eines Referenzprodukts für einen konkreten Auftrag wird also auf vorhandene Unterlagen zurückgegriffen. Lediglich für die kundenindividuellen Anpassungen müssen Lösungen neu erzeugt werden.

### 16.4.3 Entwicklung der Referenzproduktstruktur für Referenzvariante für eine Produktgruppe

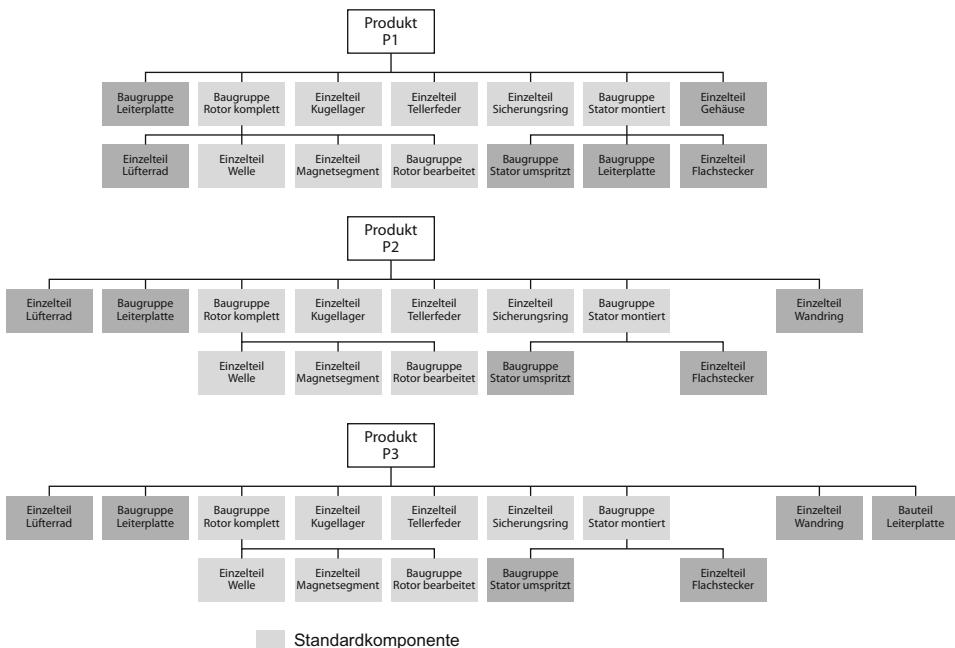
Der entscheidende Ansatz zur Rationalisierung bei der in diesem Abschnitt vorgestellten Methode des Referenzprodukts ist, wie oben beschrieben, die Beschränkung der Anzahl möglicher Baugruppenvarianten sowie die vollständige Dokumentation der Lösungen. Die Referenzproduktstruktur kann dabei gemäß Abb. 16.23 symbolisch dargestellt werden. Die Schritte zur Erstellung dieser werden im Folgenden wiedergegeben:



**Abb. 16.24** Beispielhaftes Ergebnis zur Ermittlung der Mitglieder einer Produktgruppe

**Schritt 1: Festlegen der Produkte einer Produktgruppe für die Referenzproduktstruktur**  
 Dazu werden die von einer Produktgruppe in der Vergangenheit verkauften Varianten ermittelt und betrachtet. Von diesen werden diejenigen Varianten gestrichen, die in der Zukunft nicht mehr angeboten werden sollen bzw. die in der Vergangenheit eine Ausnahme vom typischen Lieferprogramm darstellten. Als ein weiteres Ausschlusskriterium ist auch der erzielte Gewinn für eine Variante nutzbar. In Abb. 16.24 ist beispielhaft für drei Mitglieder einer Produktgruppe das Ergebnis dieses ersten Schritts wiedergegeben.

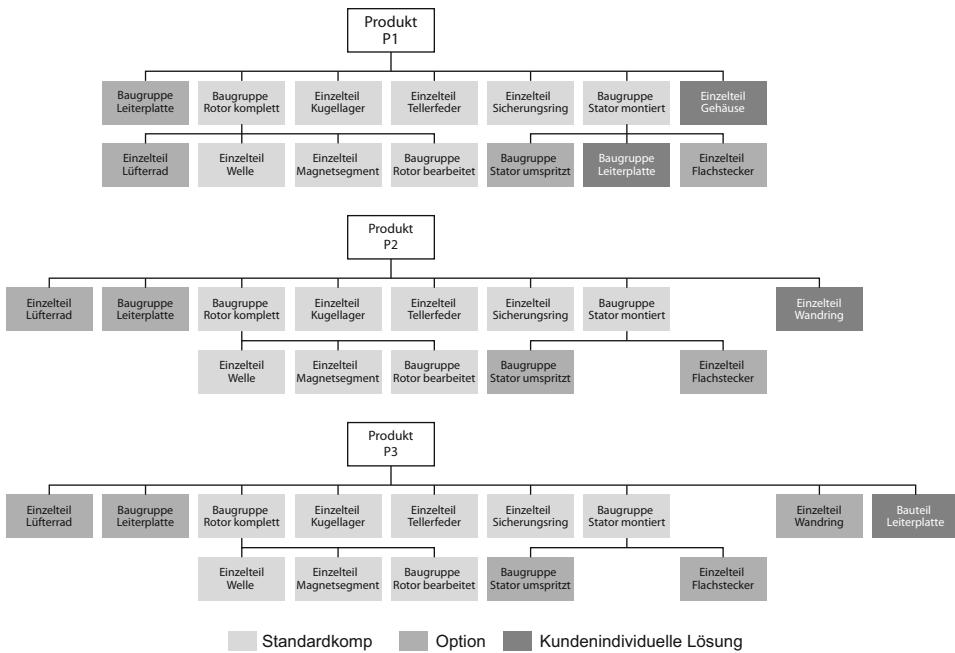
**Schritt 2: Festlegen der Standardkomponenten** Da die Produkte innerhalb einer Produktgruppe ja eine Grundähnlichkeit in ihrer Struktur und bei den wesentlichen Komponenten haben, wird als Nächstes die Gleichheit von Komponenten der verschiedenen Varianten untereinander geprüft. Meistens ergeben solche Untersuchungen, dass die verglichenen „gleichen“ Baugruppen zweier Varianten einer Produktgruppe nicht „schraubengleich“ sind, also zu 100 % in ihren Einzelteilen übereinstimmen. Hierfür gibt es eine Reihe von Gründen. Im Laufe ihres Lebens wird eine Baugruppe überarbeitet, um Verbesserungen einzuführen, oder nicht mehr lieferbare Einzelteile müssen durch Alternativen ersetzt werden. Dieser Schritt kann also dazu genutzt werden, Standardkomponenten auf Basis der gemachten Erkenntnisse festzulegen und zu dokumentieren. In Abb. 16.25 ist beispielhaft ein Ergebnis dieses Schritts wiedergegeben, die Standardkomponenten sind hell dargestellt.



**Abb. 16.25** Beispielhaftes Ergebnis des Schritts 2, Festlegen der Standardkomponenten

**Schritt 3: Ermitteln möglicher Optionen für Komponenten und ihrer Varianten** Im Rahmen dieses Schritts werden mögliche Komponenten ermittelt, welche nicht als Standard festgelegt sind und in Form von Optionen angeboten werden sollen. Die Kriterien hierbei können dieselben sein, wie sie bei der Auswahl der Mitglieder einer Produktgruppe genannt wurden. Natürlich müssen dabei auch strategische Überlegungen bezüglich der Marktentwicklung berücksichtigt werden. In Abb. 16.26 ist die Festlegung möglicher Komponenten für Optionen wiedergegeben. Sie werden gebildet von den grauen Kästen. Nachdem nun potenzielle Komponenten für Produktoptionen festgelegt wurden, ist in der Praxis, insbesondere im Anlagenbau, noch ein weiterer Schritt erforderlich. Er besteht in der Bestimmung derjenigen Komponenten, die nur kundenindividuell angeboten werden sollen.

**Schritt 4: Festlegung der kundenindividuellen Komponenten und ihrer Schnittstellen** In der Praxis ist es meistens unvermeidlich, dass z. B. Schnittstellen einer Maschine zu einer anderen bereits vorhandenen Maschine individuell angepasst werden müssen. Dies kann natürlich auch im Rahmen dieser Methode nicht unberücksichtigt bleiben. Allerdings besteht die Gefahr, dass der Umfang der frei gestaltbaren Komponenten zu groß gewählt wird und der erhoffte Rationalisierungseffekt nicht eintritt. Deshalb muss die Anzahl der kundenindividuell gestaltbaren Komponenten einer Referenzproduktstruktur so gering wie möglich gehalten werden. Wie bereits erwähnt, sind häufig die Schnittstellen von



**Abb. 16.26** Beispielhaftes Ergebnis des Schritts 3, Festlegen der möglichen Komponenten für Optionen

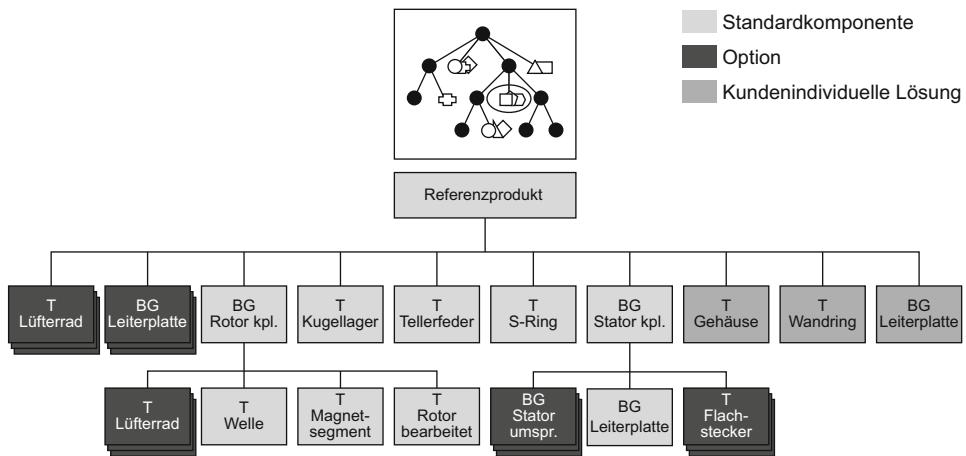
Komponenten nach außen betroffen, eine Standardkomponente kann so u. U. zu einer kundenindividuellen werden. Dies sollte möglichst vermieden werden. Deshalb ist es sinnvoll, auch die im Rahmen einer notwendigen Individualisierung eines Produkts auf Basis einer Referenzproduktstruktur anpassbaren Schnittstellen zu definieren und zu beschränken. In Abb. 16.27 ist ein Beispiel für ein Referenzprodukt und seine Referenzproduktstruktur symbolhaft dargestellt.

#### 16.4.4 Implementierung der Methode

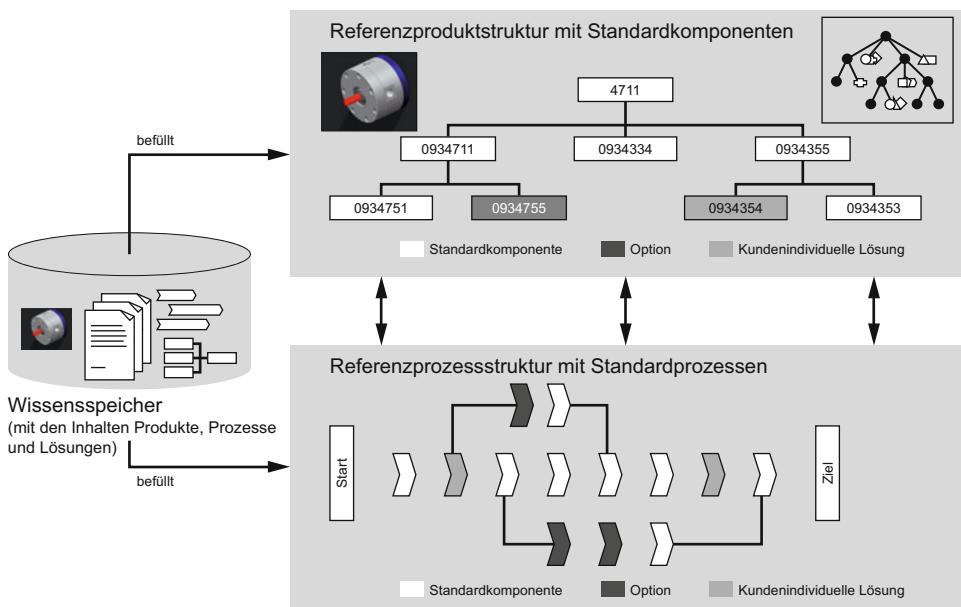
Zur Implementierung der oben vorgestellten Methode müssen drei wesentliche Komponenten abgebildet werden:

- das Referenzprodukt in seinen verschiedenen Ausprägungen,
- die konkreten Lösungen für die einzelnen Knoten des Referenzproduktes und
- die Referenzprozesse und ihre Varianten.

In Abb. 16.28 sind diese drei Komponenten in ihrer prinzipiellen Form und ihren Verknüpfungen untereinander wiedergegeben. Die *Referenzproduktstrukturstückliste* beinhaltet die in Abb. 16.23 dargestellte Referenzproduktstruktur, wobei für jeden Knotenpunkt

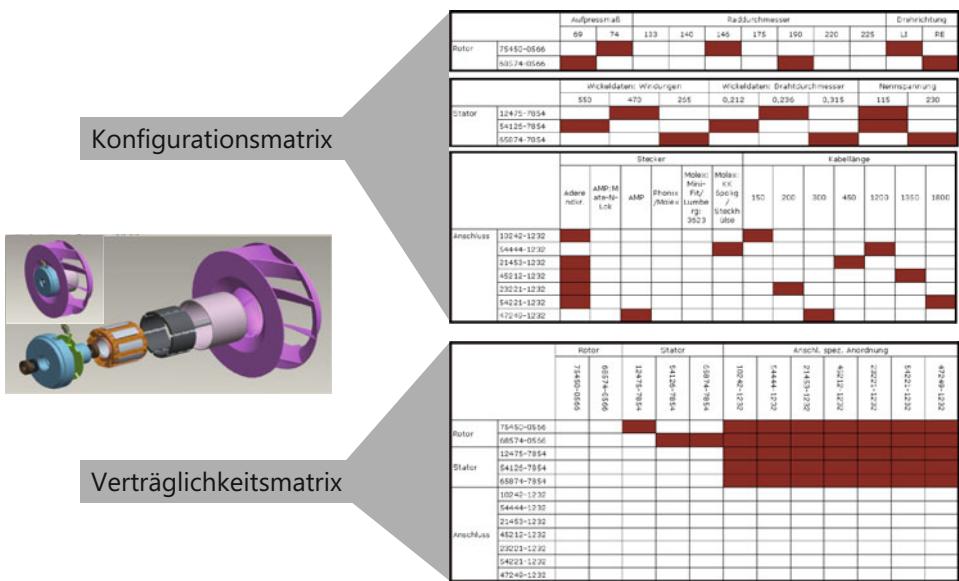


**Abb. 16.27** Beispiel eines Referenzproduktes, symbolische Darstellung



**Abb. 16.28** Komponenten eines Systems auf Basis eines Referenzproduktes

(Standards der Referenzproduktstruktur) und jedes Formsymbol (Optionen der Referenzproduktstruktur) konkrete Bauteile bzw. Baugruppen festgelegt sind. Sie wird in ihren verschiedenen strukturellen Ausprägungen heute überwiegend in Form einer Variantenstrukturstückliste in einem PPS (Produktionsplanungs- und -steuerungssystem) abgebildet, welches ein Teilsystem eines ERP-Systems ist. Sie kann aber auch in einem PDM-System gespeichert und verwaltet werden. An den Stellen dieser Stücklisten, an de-

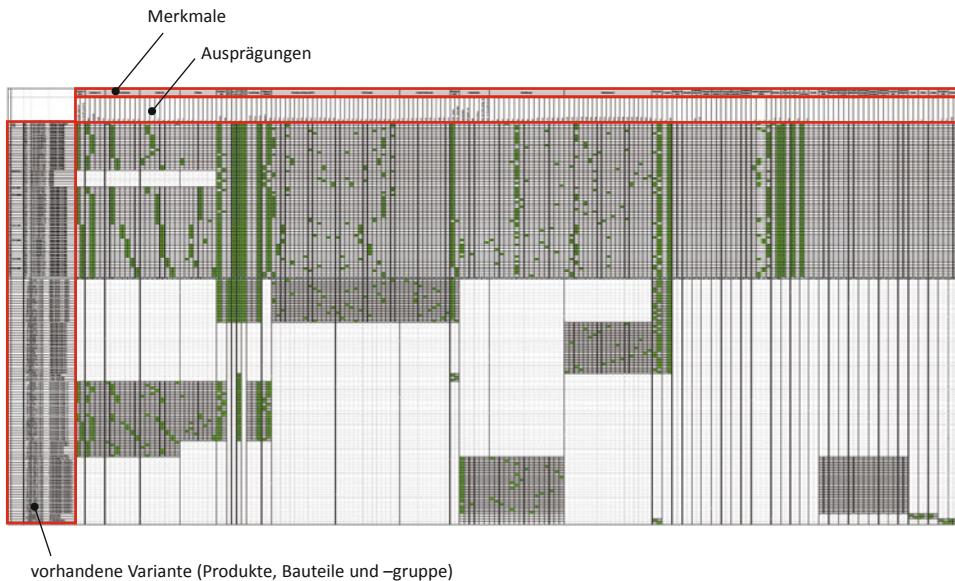


**Abb. 16.29** Konfigurationsmatrix und Verträglichkeitsmatrix eines Lüfters

nen Standard-, also nicht veränderbare Komponenten eingesetzt werden, befindet sich die konkrete Ident-Nummer dieser Komponenten (weiße Formen in der Struktur in Abb. 16.28). An den Stellen der Struktur, an denen verschiedene, aber definierte und in ihrer Varianz beschränkte Komponenten (Optionen) eingesetzt werden können, befindet sich in der Struktur jeweils ein Platzhalter. Die konkrete Ident-Nummer für diese Position in der Stückliste ergibt sich dann durch die Festlegung der zu verwendenden Option (Baugruppe, Bauteil). Müssen an den dafür vorgesehenen Stellen in der Struktur kundenindividuelle Anpassungen vorgenommen werden, so werden diese im Rahmen eines Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erstellt und die Ident-Nummern der so entstandenen Komponenten in die Struktur eingefügt.

Grundsätzlich stellt die oben beschriebene Methode eine Form des Konfigurationsmanagements dar. Das bedeutet, es werden neben den zugelassenen Strukturen und Komponenten einer Referenzvariante auch die Verträglichkeiten der Komponenten bei deren verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten untereinander in Form einer Verträglichkeitsmatrix gespeichert, s. Abb. 16.29. Die dort aufgeführte Konfigurationsmatrix bildet die zulässigen Varianten der jeweiligen Produktkomponenten ab. In dem dargestellten Beispiel eines Lüfters sind drei Hauptkomponenten, der Rotor, der Stator und der Anschluss, in unterschiedlichen Ausprägungen einsetzbar. Die untere Matrix der Abbildung stellt die Verträglichkeiten der Komponenten untereinander dar. Mit ihrer Hilfe wird also abgebildet, welche Komponente aus technischer und wirtschaftlicher Sicht mit welcher kombiniert werden darf.

In Abb. 16.30 ist die implementierte Konfigurationsmatrix des in Abb. 16.29 dargestellten Lüfters wiedergegeben. Die Abbildung verdeutlicht, dass bereits bei relativ einfachen



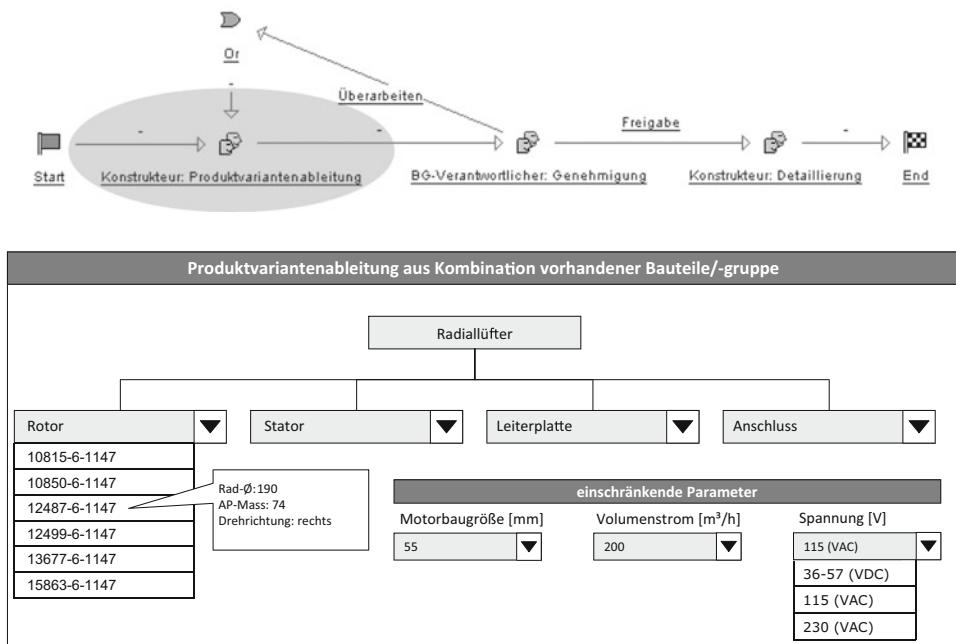
**Abb. 16.30** Implementierte Konfigurationsmatrix des in Abb. 16.29 dargestellten Lüfters

Produkten das Aufstellen einer Konfigurations- und ebenso einer Verträglichkeitsmatrix relativ aufwändig sein kann.

Bezüglich des Produkts sind damit die Komponenten des Systems vereinfacht in Abb. 16.28 im oberen Teil und teilweise im Speicher auf der linken Seite wiedergegeben. In derselben Abbildung unten sind die Referenzprozesse dargestellt, deren variable Komponenten, Teilprozesse, ebenfalls im Speicher des Systems abgelegt sind. Um diese Prozesse soll es im Folgenden gehen.

Wie bereits beschrieben, können *Prozesse* nicht direkt, sondern nur indirekt durch die miteinander verknüpfte Abfolge von Anweisungen für Aktionen abgebildet werden. Diese Abbildung erfolgt heute überwiegend mit Hilfe von PDM-Systemen. Die im Rahmen der in diesem Abschnitt vorgestellten Methode erläuterten Standardprozesse können also ebenfalls in einem PDM-System in Form eines Workflows gespeichert werden.

Neben der Definition des Referenzproduktes muss für jede seiner Ausprägungen auch ein zugehöriger Standardprozess festgelegt werden. Durch diesen werden alle Vorgänge und Aktionen inklusive der zu verwendenden Hilfsmittel und der erzeugten Unterlagen beschrieben, die für die Erstellung eines Produkts entsprechend des gewählten Referenzproduktes erforderlich sind. Mit der Auswahl des Referenzproduktes wird entsprechend der auszuführende Standardprozess bestimmt. Das Referenzprodukt erlaubt an definierten Stellen in begrenzter Anzahl Ausführungsvarianten von Komponenten. Für den Prozess ergibt sich hieraus die Notwendigkeit, dass für diese variierbaren Komponenten auch unterschiedliche Teilprozesse für ihre Fertigung, Beschaffung usw. ausgeführt werden müssen. Aus diesem Grund kann es erforderlich sein, an bestimmten Stellen eines Standardprozesses

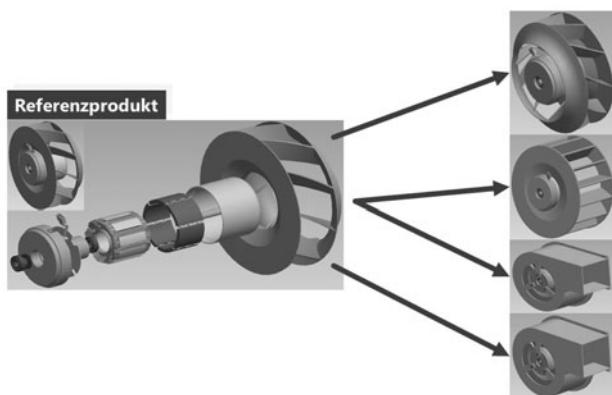


**Abb. 16.31** Beispiel für einen im PDM-System implementierten Auswahlprozess für ein Referenzprodukt (Ausschnitt)

für ein Referenzprodukt ebenfalls eine Variante eines Teilprozesses vorzusehen. Dies kann auch bei einer Änderung der gefertigten Stückzahlen der Fall sein. Bei einer Erhöhung ist ab einer bestimmten Stückzahl eine Änderung der Fertigungsart von beispielsweise einer Schweißkonstruktion für ein Getriebegehäuse auf eine Gusskonstruktion sinnvoll. Bei Beibehaltung aller Schnittstellenmaße für z. B. die Wellenlager, ändert sich dann meistens die Beschaffungsart von „Eigenfertigung“ in „Fremdfertigung“. Dies hat entsprechend andere Beschaffungsprozesse zur Folge, die im Workflow des Referenzprozesses in Form einer Prozessvariante berücksichtigt werden müssen, s. Abb. 16.28. Diese erforderliche Verknüpfung zwischen dem Referenzprodukt und seinem zugehörigen Standardprozess ist durch die senkrechten Pfeile zwischen den beiden Bereichen angedeutet.

Der in Abb. 16.28 dargestellte „Wissensspeicher“ wird im Wesentlichen gebildet durch die Datenbanken, die mit den für die Durchführung des Standardprozesses vorgesehenen Applikationen (Office-Systeme, CAx-Systeme usw.) verknüpft sind. Es handelt sich dabei also nicht um ein geschlossenes System, vielmehr wird auf die notwendigen Daten, die in den Datenbanken gespeichert sind, entweder über die Anwendung einer Applikation oder direkt über ein PDM-System zugegriffen. In Abb. 16.31 ist beispielhaft ein in einem PDM-System implementierter Prozess wiedergegeben. Es handelt sich dabei um die Auswahl einer Produktvariante. Dieser Prozessschritt ist ein Teilprozess der Produktentstehung. Im oberen Teil der Abbildung ist der Workflow, also die Abbildung des Prozesses,

**Abb. 16.32** Mithilfe eines CAD-Systems visualisiertes Referenzprodukt des Lüfters aus Abb. 16.29 und Abb. 16.31 mit den Ausprägungen



so wiedergegeben, wie er bei dem verwendeten PDM-System dargestellt wird. Im unteren Teil ist das Auswahlergebnis zu sehen. Dabei handelt es sich um die Darstellung der Referenzproduktstruktur mit ihren Auswahlmöglichkeiten.

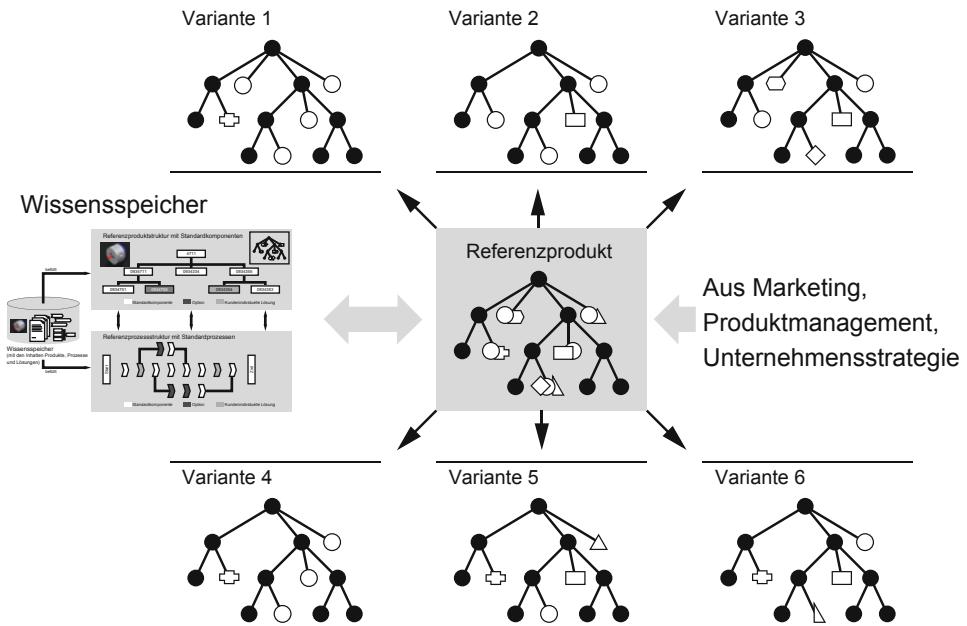
Neben der schematischen Darstellung der Referenzproduktstruktur, wie sie in Abb. 16.31 wiedergegeben ist, können das Referenzprodukt und seine Referenzproduktstruktur mit den Kombinationsmöglichkeiten auch mithilfe eines CAD-Systems visualisiert werden, s. Abb. 16.32.

#### 16.4.5 Arbeitsablauf bei Anwendung der Referenzproduktstruktur

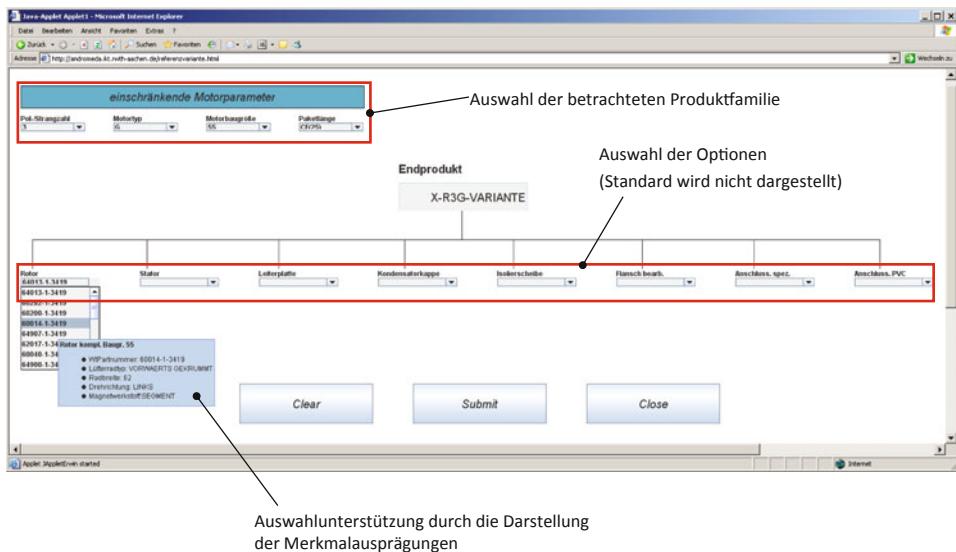
Der erste Schritt besteht in der Auswahl des Referenzprodukts. Wie bereits oben dargestellt, sind entsprechend den Produktgruppen eines Unternehmens mehrere Referenzprodukte notwendig und sinnvoll. Hintergrund dieser Überlegung ist es, den Umfang der Varianz in den Referenzproduktstrukturen eines Referenzprodukten nicht zu groß und damit zu komplex werden zu lassen. In der Praxis sollte die Auswahl möglicher Referenzprodukte durch eine entsprechende Vertriebsstrategie bereits von vorneherein eingeschränkt werden, s. Abb. 16.33.

Durch die Festlegung eines Referenzprodukts als Basis für die Auftragsabwicklung werden auch automatisch die zum Referenzprodukt gehörigen Referenzproduktstrukturen festgelegt. Diese Festlegung ist beispielhaft in Abb. 16.34 wiedergegeben. Die Abbildung zeigt die Bildschirmdarstellung einer Implementierung mittels eines PDM-Systems. Mit der Wahl der Produktfamilie, also der Referenzstruktur, Bildteil oben, wird automatisch die Referenzproduktstrukturen mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen dargestellt, Bildteil unten.

Die Konfiguration des Produkts auf Basis der Referenzproduktstrukturstückliste erfolgt dann durch Auswahl der konkreten Optionen für jede variierbare Komponente. In Abb. 16.35 sind zwei Beispiele dargestellt, wie diese Auswahl bei einer mittels PDM-System realisierten Implementierung aussehen kann.



**Abb. 16.33** Variantenerstellung auf Basis eines Referenzproduktes



**Abb. 16.34** Auswahl eines Referenzprodukts mittels eines PDM-Systems

Die oben vorgestellte Methode hat auch Auswirkung auf die Organisation eines Unternehmens. In Abb. 16.36 ist ein möglicher Organisationsaufbau hierfür wiedergegeben.

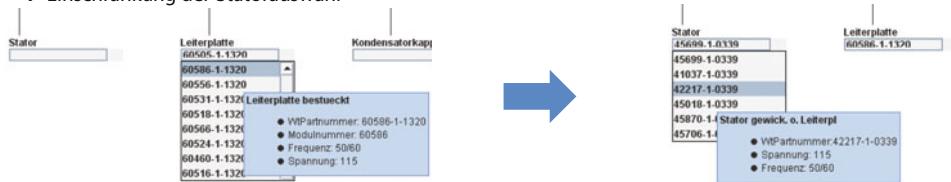
Deutlich wird die eindeutige organisatorische Trennung zwischen den Aufgaben zur Definition der Referenzprodukte und deren Referenzproduktstrukturen und der Ableitung

**Beispiel 1:** Stator für Spannung 230 Volt zuerst ausgewählt

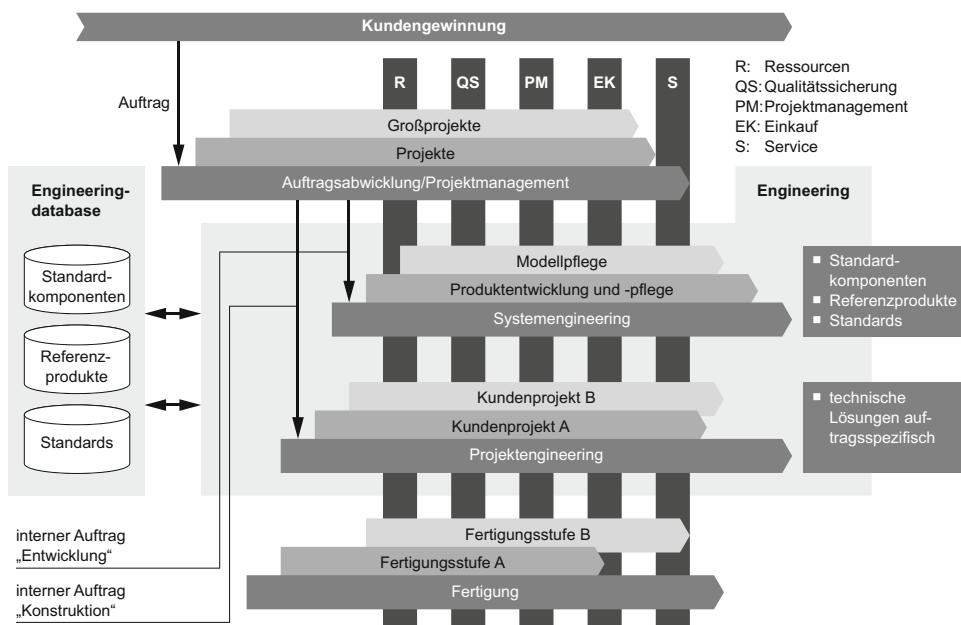
→ Einschränkung der Leiterplattenauswahl

**Beispiel 2:** Leiterplatte für Spannung 115 Volt zuerst ausgewählt

→ Einschränkung der Statorauswahl



**Abb. 16.35** Ableiten der Produktvariante aus der Referenzproduktstrukturstückliste mittels eines PDM-Systems



**Abb. 16.36** Organisation bei Anwendung des Referenzprodukts

auftragsspezifischer Produkte aus diesen, siehe Kästen auf der rechten Seite der Abbildung. Typischerweise wird für solche Aufgaben in der Praxis die Form einer Matrixorganisation gewählt. Dabei werden Projektteams zur Lösung spezifischer Aufgaben zeitlich begrenzt zusammengestellt. Daneben sind noch Querschnittsaufgaben zu erfüllen, wie z. B. das Projektmanagement oder die Qualitätssicherung. Sie sind als senkrechte Pfeile in Abb. 16.36 symbolisiert.

#### 16.4.6 Bewertung der Methode

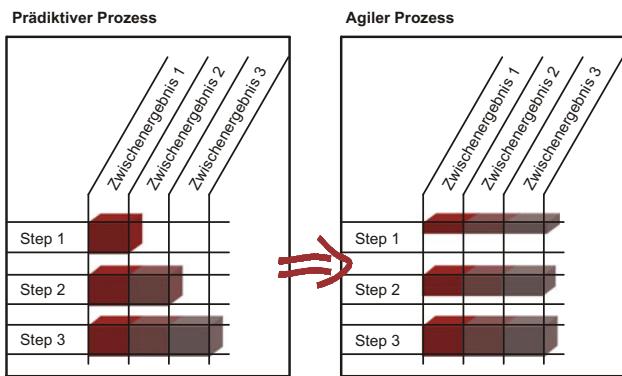
Die in diesem Abschnitt vorgestellte Methode ist zwar insbesondere, aber nicht nur für den Anlagenbau geeignet. Dieser ist durch eine z. T. sehr kundenindividuelle Produktgestaltung gekennzeichnet. Die hier vorgestellte Methode beruht auf einer bewussten und gezielten Einschränkung der Varianten eines Produkts. Damit geht für ein Unternehmen zwangsläufig ein Verlust an Flexibilität gegenüber der Erfüllung von Kundenwünschen einher. Diesen vom Kunden als negativ empfundenen Auswirkungen steht auf der anderen Seite eine mögliche Reduktion der Kosten sowohl für das erstellende Unternehmen als auch für den Anwender gegenüber. Die erzielten Kostenreduktionen auf der Unternehmensseite müssen heute fast zwangsläufig durch einen reduzierten Preis an den Kunden weitergegeben werden. Höhere Stückzahlen und sicherere Prozesse verringern nicht nur die Ersatzteilkosten, sondern erhöhen auch die Produktqualität. Die erfolgreiche Anwendung der Methode hängt ganz wesentlich von ihrer konsequenten Umsetzung, Reduktion der Varianten und einer möglichst sicheren Einschätzung des Marktes ab.

---

### 16.5 Der agile Entwicklungs- und Konstruktionsprozess (Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote)

Der im Folgenden dargestellte Ansatz beruht auf Vorgehensweisen bei der Softwareentwicklung. Sehr früh stand die Softwareentwicklung vor dem Problem, sich schnell ändernde Kundenanforderungen in die Produkte zu integrieren. Um die geforderte schnelle Umsetzung bei einer Reduktion der Entwicklungsrisiken realisieren zu können, wurde dabei die neue Software auf der Basis bereits vorhandener Softwarekomponenten erweitert oder korrigiert. Dies ermöglichte eine sehr schnelle Reaktion auf neue Marktbedürfnisse. Gleichzeitig konnte das vorhandene Know-how genutzt werden. Vor diesem Hintergrund sind sog. „agile Konzepte“ entwickelt worden. Diese gehen zurück auf das Agile Manifest (Beck et al. 2001) und sind in der Software Community weit verbreitet. Seit den 1990er Jahren werden agile Konzepte in zunehmendem Maße auch in der kommerziellen Softwareentwicklung eingesetzt (Larman und Basili 2003). So nutzen 14 % der nordamerikanischen und europäischen Unternehmen agile Konzepte für ihren Softwareentwicklungsprozess und weitere 19 % planen solche einzuführen (Fowler 2005). Dieses Vorgehen machen sich auch Unternehmen zunutze, die ähnlich wie bei der Softwareindustrie einen großen Anteil ähnlicher

**Abb. 16.37** Vergleich zwischen einem herkömmlichen (prädiktiven) und einem agilen Prozess (Feldhusen et al. 2009)



Produkte in ihrem Portfolio haben, die schnell auf neue Marktbedürfnisse angepasst werden müssen.

Eine agile Vorgehensweise ist allgemein durch eine Unterteilung des Projekts in mehrere Ausbaustufen bzw. Iterationen des Produkts und eine anfängliche Fokussierung auf die Hauptkriterien zur raschen Bedienung der Kundenbedürfnisse gekennzeichnet, s. Abb. 16.37. Die Balkenhöhe in den Diagrammen der Abbildung symbolisiert die Betrachtungstiefe während der einzelnen Schritte des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses.

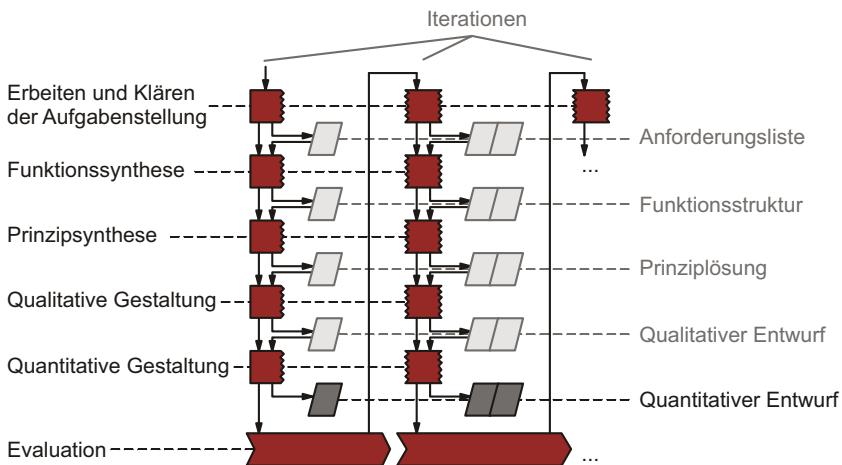
Im Gegensatz zu konventionellen Prozessen bei der Entwicklung und Konstruktion von Produkten werden bei der agilen Vorgehensweise alle Arbeitsschritte möglichst schnell durchlaufen. Dabei wird in Kauf genommen, dass nicht alle Aspekte des Produkts im Rahmen des betreffenden Arbeitsschritts zufriedenstellend gelöst werden. Der Gesamtblick auf das Produkt und die Schnelligkeit des Prozesses stehen im Vordergrund, oder anders ausgedrückt: „Vollumfänglichkeit des Prozesses vor Tiefe der Betrachtung“.

Eine Agilisierung von Prozessen in der Konstruktion gewinnt vor allem dadurch an Relevanz, dass durch die kontinuierliche Fortentwicklung und wachsende Verbreitung digitaler Prototypen die Bedeutung der Fertigung für die Beurteilung eines Produktes schwindet und die Konstruktion diesbezüglich der Softwareentwicklung zunehmend ähnelt.

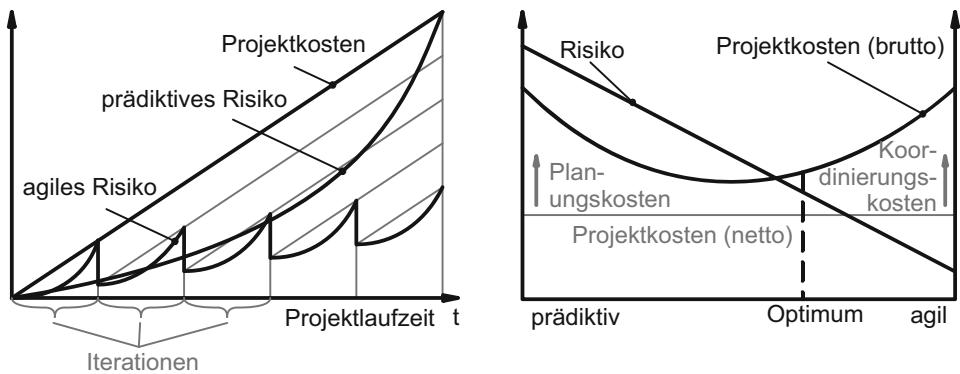
Im Gegensatz zur herkömmlichen (prädiktiven) Vorgehensweise der Konstruktion mit sequenziellen Prozessen bestehen agile Konstruktionsprozesse aus einer Folge von Iterationen. Diese haben jeweils die Struktur eines präskriptiv-normativen Konstruktionsprozesses. So wird das bei herkömmlichen Prozessen vorhandene Risiko vermindert, dass es – wie oben beschrieben – zu Diskrepanzen zwischen Bedarf und Realisierung kommt. Der Verlauf konventioneller Prozesse wird ja gemäß den eingangs ermittelten Anforderungen vorausgeplant.

Diese Iterationen untergliedern den Gesamtprozess vertikal in einzelne Segmente. Am Ende einer Iteration liegt jeweils ein (digitaler) Prototyp vor, der zunächst nach dem Prinzip der „low-hanging fruits“ ausschließlich die wichtigsten Anforderungen berücksichtigt und im Verlaufe der nachfolgenden Iterationen sukzessive vervollständigt und verfeinert wird.

Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen findet jeweils eine Evaluation statt, s. Abb. 16.38. Jede einzelne Iteration eines agilen Konstruktionsprozesses bedarf entspre-



**Abb. 16.38** Iteratives Vorgehen bei agilen Prozessen mit einer Evaluation zwischen den einzelnen Iterationen



**Abb. 16.39** Prinzipieller Vergleich der Risiken und Projektkosten bei prädiktiven und agilen Prozessen

chend der Ergebnisse der vorangegangenen Evaluation einer Überarbeitung der zugrunde liegenden Anforderungen.

Werden die anfallenden Revisionskosten im Falle einer Fehlentwicklung betrachtet, so ist das Risiko agiler Prozesse generell geringer als dasjenige prädiktiver Prozesse (s. Abb. 16.39, links). Da bei prädiktiven Prozessen der Abstraktionsgrad der Zwischenergebnisse zunächst hoch ist und erst gegen Ende des Prozesses abnimmt, besteht die Tendenz, Fehlentwicklungen zu spät zu entdecken. Entsprechend steigt das Risiko gegen Ende der Projektlaufzeit stark an. Hingegen findet bei agilen Prozessen nach jeder Iteration eine Revision des noch unvollendeten Produktes statt. Hierdurch bleibt nur ein vergleichsweise geringes Restrisiko bestehen. Abb. 16.39 (rechts) verdeutlicht, dass es zwischen den beiden Extremen „reiner prädiktiver“ Prozess und „rein agiler“ Prozess ein Optimum bezüglich des Verhältnisses von Projektkosten zum Projektrisiko gibt. Die

Kosten werden aus der Summe der Netto-Projektkosten und den Planungs- und Koordinierungskosten gebildet. Die Netto-Projektkosten entstehen durch die Erarbeitung der Inhalte, also der Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten. Während Planungskosten aufgrund der größeren Planungstiefe vermehrt bei prädiktiven Projekten anfallen, verursachen agile Projekte höhere Koordinierungskosten zur Bewältigung der stärkeren Prozessdynamik (Feldhusen und Bungert 2008).

### 16.5.1 Produktentwicklung auf Basis von Analogiebetrachtungen (Jörg Thon)

Eine weitere Methode, welche in der Praxis häufig anzutreffen ist, ist die Analogiebetrachtung. Hierbei wird versucht, aus den Lösungen fremder Branchen Erkenntnisse und Lösungen für eine aktuelle Aufgabenstellung abzuleiten. Beispielsweise stellen sich bei der Förderung von Zucker in der Lebensmittelindustrie ähnliche Probleme bezüglich Verschleiß und Staubbelastung der eingesetzten Maschinen wie in der Bauindustrie an Stellen, wo Sand gefördert werden muss.

Bei der hier vorgestellten Entwicklung ging es um eine Knochenzementspritze. Die Verwendung von injizierbarem Knochenzement, um Zwischenräume nach bestimmten Knochenbrüchen zu füllen, ist eine etablierte Methode in der Medizin. Die dafür verfügbaren Produkte sind komplex in der Handhabung, aufwändig in der Vorbereitung, und das Resultat wird bei der Anwendung stark von menschlichen Einflussfaktoren bestimmt. Der Medizinproduktthersteller Stryker bietet einen injizierbaren Knochenzement (HydroSet®) an, der eine zweistufige Vorbereitung erfordert: (a) Anmischen des Zementes, und (b) Transfer des angemischten Zementes in den vorgesehenen Spritzenkörper, bevor die Applikation durch den Arzt beginnen kann.

Das vom Kunden gewünschte Produkt der nächsten Generation zielt auf die Eliminierung der beschriebenen Vorbereitungsschritte ab. Dieses soll die menschlichen Einflussfaktoren minimieren und die Anwendung für den Arzt erleichtern. Dazu muss das angestrebte System zwei reagente, hochviskose Flüssigkeiten speichern, bei Bedarf homogen mischen und in den Knochenspalt applizieren können. In Abb. 16.40 ist die Applizierung von Knochenzement dargestellt.

Das Ziel der Entwicklung der Knochenzementspritze ist die Realisierung einer sicheren und effektiven, aber auch wirtschaftlichen Lösung mit möglichst geringem Zeit- und Ressourcenaufwand.

Eine iterative Herangehensweise während der Entwicklung und die damit verbundene mehrmalige Überprüfung und Evaluierung der hergestellten Prototypen soll die stabile Aufbewahrung der gespeicherten Flüssigkeiten und die Wiederholbarkeit des Resultates sicherstellen, um den hohen Qualitätsanspruch an die Funktion zu erfüllen.

Die Suche nach analogen Lösungen zur Übertragung der ausgewählten Funktionsstrukturen in ein Konzept beschränkt sich zunächst auf die Recherche in verwandten Themengebieten innerhalb der Medizintechnik. Die Analyse der Wettbewerber führt jedoch nicht zu einer, nach Maßgabe der Anforderungen, zufriedenstellenden Lösung, so dass die Suche auf die gesamte Medizintechnik, aber auch andere industrielle Zweige

**Abb. 16.40** Applikation von Knochenzement in einen Knochenspalt durch eine befüllte Spritze



erweitert werden muss. Das analoge System findet sich hier also nicht zwingend, oder sogar sehr unwahrscheinlich in dem gleichen Anwendungsgebiet, sondern muss übertragen werden, da es sich um ein, für diese Anwendung, innovatives Produkt handelt. Die Recherche nach Zweikomponenten-Mischsystemen ist hauptsächlich auf dem Gebiet der Klebstoffindustrie, aber auch in fremden Gebieten der Medizintechnik erfolgreich.

Bei der Recherche in anderen Anwendungsgebieten muss eine genauere Prüfung der gefundenen Lösungsoption auf Anwendbarkeit stattfinden, die das Lösungsfeld einschränkt. Dabei wird die Realisierbarkeit der ausgewählten Funktionsstruktur mit dem vermeintlich analogen technischen System bewertet. Hierbei handelt es sich nicht um die Suche nach einem analogen Komplettsystem, das als Lösung für die gesamte Funktionsstruktur dienen soll, sondern vielmehr um die Findung von Teillösungen, die auch eine Kombination ihrer selbst zulassen. So können nach funktionellen und wirtschaftlichen Kriterien die existierenden Lösungen, wie z. B. das Mischer-Element und seine Einbettung in das Mixergehäuse, realisiert werden. Dabei ist eine Adaption der Teillösungen notwendig, um die Schnittstellen aneinander anzupassen.

Eine weitere Auswahl der gefundenen Lösungsoptionen erfolgt anhand der Kriterien, die später für das gesuchte System und dessen Einsatzbereich von Relevanz sind, wie beispielsweise die Strahlen-Sterilisierbarkeit des Materials.

Der Zeitpunkt der Analogiebetrachtung im Entwicklungsprozess wird so gewählt, dass die Problemstellung möglichst konkret vorliegt und eine Funktionsstruktur als Lösungsansatz existiert. Damit kann die Analogiebetrachtung als effektives Werkzeug für den Transfer hin zum Wirkprinzip bzw. Lösungskonzept genutzt werden und die umfangreiche Lösungssuche anhand von Katalogen und „breiten“ diskursiven Methoden durch eine heuristische FAVORISIERUNG bestehender Lösungen verschmälert werden.

**Abb. 16.41** Finale  
Prototypenversion der  
Entwicklung der Zementspritze  
in befülltem Zustand



Die vorangehende Erarbeitung der Funktionsstruktur und das Bewerten der heuristisch gefundenen Lösungen werden als diskursive Rahmenelemente im Entwicklungsprozess verwendet und fügen sich damit adäquat in den verwendeten iterativen Entwicklungsprozess ein.

Die Entwicklung des Konzeptes der Knochenzementspritze kann mit Hilfe der Analogiebetrachtung erfolgreich realisiert werden. Der Aufwand an Zeit und Ressourcen kann durch die heuristische Methode verringert werden, und die Einbettung in die diskursiv betonten Entwicklungsschritte vorher und nachher wird als fördernd wahrgenommen, weil der Verlust der Struktur des Entwicklungsvorgangs gering ist.

Die Vereinigung existierender Teillösungen und teilweise auch Adaption auf das Anwendungsgebiet ermöglicht eine wirtschaftliche Umsetzung und wird durch eine hohe reproduzierbare Qualität der gefundenen technischen Lösung charakterisiert, indem bekannte und etablierte Systeme zur Verwendung kommen.

Das Resultat der Entwicklung ist die in Abb. 16.41 wiedergegebene Prototypenversion der Zementspritze, die die gesuchte Lösung für das geschilderte Problem darstellt.

Die Analogiebetrachtung hat zum Vorteil, dass die bestehenden Lösungen auf die Anwendbarkeit bei der vorhandenen Problemstellung überprüft werden können, darüber hinaus jedoch auch als kreativer Anstoß und später auch je nach Ähnlichkeitsgrad als Bewertungsrichtlinie herangezogen werden kann. Dabei kann das entwickelte Konzept an den vorhandenen Lösungen gemessen werden.

Die bereits realisierte technische Umsetzung des analogen Produktes und die Erfahrungen des Marktes birgt zudem die entscheidenden Vorteile, dass die Machbarkeit des angestrebten Produktes zumindest in Teilespekten schon bewiesen ist, aber zum anderen auch, dass sich das Produkt auf die Sicherheit des vorhandenen Systems stützen oder zumindest in Teilespekten stützen kann.

Die Realisierung der Knochenzementspritze anhand von Analogiebetrachtungen hat gezeigt, dass diese Methode als adäquates Mittel zur Umsetzung eines schnellen und sicheren Entwicklungs-Zyklus herangezogen werden kann. Hierbei sind für den Erfolg der Entwicklung die Anwendbarkeit der analogen Produkte auf die vorhandene Problemstellung und die Existenz analoger Lösungen ausschlaggebend.

Die Analogiebetrachtung muss im Entwicklungsprozess erfolgen, wenn bereits konkrete Problemstellungen und eine oder mehrerer Funktionsstrukturen oder Wirkprinzipien vorliegen. Dies ermöglicht die heuristische Findung einer Lösung und deren Prüfung auf Anwendbarkeit innerhalb des insgesamt diskursiv betonten Entwicklungsvorgehens.

## Literatur

### Abschnitt 16.1

- Kramer M (1993) Konstruktionsmanagement – eine Hilfe zur beschleunigten Produktentwicklung. Konstruktion 45:211–216  
Schlick C, Bruder R, Luczak H (2010) Arbeitswissenschaft, 3. Aufl. Springer, Heidelberg

### Abschnitt 16.2

- Alexander C, Ishikawa S, Silverstein M (1977) A pattern language. Oxford University Press, New York  
Anderl R, Grabowski H (2011) Elektronische Datenverarbeitung. In: Grote K-H, Feldhusen J (Hrsg) Dubbel, 23. Aufl. Springer, Berlin  
Bungert F (2009) Pattern-basierte Entwicklungsmethodik für Product-Lifecycle Management. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Bd 8. Shaker, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen  
Ehrlenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung, 4. Aufl. Hanser, München  
EOS GmbH (2012) EOSINT M280 Laser-Sinter System. München  
Feldhusen J, Gebhardt B (2007) Product Lifecycle Management für die Praxis. Springer, Berlin  
North K (2002) Wissensorientierte Unternehmensführung, 3. Aufl. Gabler-Verlag, Wiesbaden  
Stratasys Inc. (2012) Stratasys Fortus 900 MC. Frankfurt

### Abschnitt 16.3

- Bräutigam L-P (2004) Kostenverhalten bei Variantenproduktion. GWV Verlage, Wiesbaden  
DIN 199 T1 (2002) Begriffe. Technische Produktdokumentation: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Beuth, Berlin  
Franke H-J, Hesselbach J, Huch B, Firchau NL (Hrsg) (2002) Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Carl Hanser, München  
Logistik (2012) <http://www.logistik-lexikon.de/ccViid704.html>

### Abschnitt 16.4

- Nurcahya EZ (2009) Ein Produktmodell für das rechnerunterstützte Variantenmanagement. Diss. RWTH Aachen 2009. Erschienen in der Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktion Bd 7. Shaker, Aachen

### Abschnitt 16.5

- Beck K, Beedle M et al (2001) Manifesto for Agile Software Development. <http://www.agilemanifesto.org>. Zugegriffen: 27. Aug 2007  
Feldhusen J, Bungert F (2008) Agile PDM-Einführung, Teil 2. In: eDM-Report Nr 1

- Feldhusen J, Löwer M, Bungert F (2009) Agile methods for design to customer. International Conference on Engineering Design, ICED'09. 24–27 August 2009
- Fowler M (2005) The new methodology. <http://www.martinfowler.com/articles/newMethodology.html>. Zugegriffen: 25. Aug 2007
- Larman C, Basili VR (2003) Iterative and incremental development: a brief history. *IEEE Comput* 36(6):47–56 (June)

Thomas Vietor und Carsten Stechert

---

## 17.1 Konventionelle Ansätze (Thomas Vietor, Carsten Stechert)

In vielen Unternehmen wachsen Produktspektren über Jahre. Werden vom Kunden explizit oder auch implizit durch Marktforschung neue Produkte oder Produkte mit geänderten Spezifikationen angefragt, so werden neue Varianten entwickelt. Ziel dabei ist es, einem Rückgang des Absatzes entgegenzuwirken. Durch die Einführung neuer Varianten kommt es jedoch zu einer Erhöhung der Innenkomplexität, z. B. durch mehr unterschiedliche Bauteile und Fertigungsprozesse, wodurch weitere Kosten (insbesondere Gemeinkosten) entstehen. Wenn dem keine ausreichende Erhöhung der Absatzvolumina gegenübersteht, werden die Produkte insgesamt zu höheren Preisen angeboten werden müssen, um kosten-deckend zu arbeiten. Dieses führt letztendlich zu einem Verlust der Wettbewerbsfähigkeit und einem weiteren Rückgang der Absatzvolumina. Dieser „Teufelskreis“ ist in Abb. 17.1 dargestellt.

Die Entwicklung von Baukästen, Baureihen oder modularen Ansätzen wird häufig als ein Mittel gesehen, um variantenreiche Produktspektren für das Unternehmen wirtschaftlich abzubilden (Franke und Firchau 2002). Die konkreten Gründe, die zur Entscheidung für den Einsatz von Baukastenansätzen führen, sind jedoch vielschichtig. Es lassen sich externe und interne Gründe unterscheiden.

*Externe Gründe* resultieren z. B. aus der fortschreitenden technologischen Entwicklung, die immer kürzere Produktzyklen („taktische Zyklen“) notwendig macht, damit die Produkte den neuesten Stand der Technik widerspiegeln. Gleichzeitig werden neue

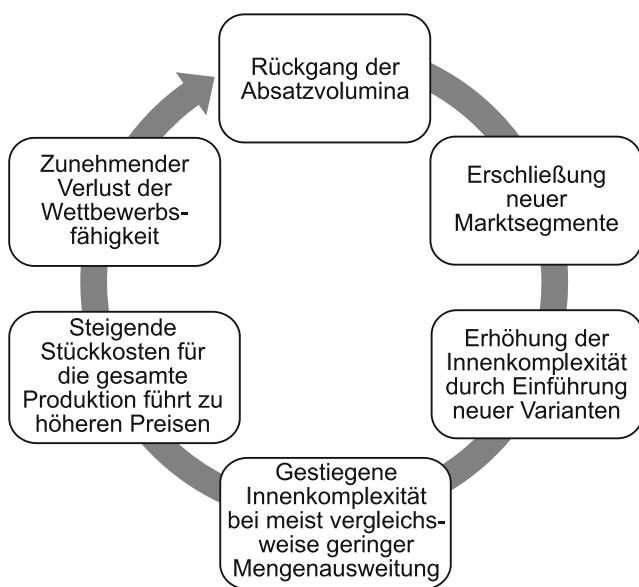
---

T. Vietor (✉) · C. Stechert

Institut für Konstruktionstechnik (IK), Technische Universität Braunschweig,  
Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, Deutschland  
E-Mail: t.vietor@tu-braunschweig.de

C. Stechert  
E-Mail: c.stechert@tu-braunschweig.de

**Abb. 17.1** Teufelskreis bei Einführung neuer Varianten und damit Erhöhung der Innenkomplexität im Unternehmen (nach Rathnow 1993)



(Fertigungs-) Technologien entwickelt, die für einige Bauteile eines Produkts Anpassungen ermöglichen bzw. erfordern. Schließlich ermöglichen moderne Informationswege eine schnelle, weltweite Informationsbeschaffung und damit Vergleichsmöglichkeiten zu benötigten Produkten.

Insbesondere für den Bereich der Konsumgüter spielt der gesellschaftliche und politische Wandel eine große Rolle. Produkte sollen möglichst kundenindividuell, zumindest jedoch individualisierbar sein. Selbst innerhalb eines Marktes unterscheiden sich Werte und Normen der Kunden stark voneinander. Nicht zuletzt hat sich in der Vergangenheit das Kaufkraftaufkommen stark verschoben. So werden viele Kaufentscheidungen wesentlich durch Kinder und junge Erwachsene beeinflusst bzw. getroffen. Gleichzeitig erhöht sich die Kaufkraft der älteren Generation durch den Wandel der demografischen Strukturen erheblich. Dazu kommen die Einflüsse des politischen Wandels, z. B. in Asien oder Südamerika, die neue Märkte schaffen, aber auch bewirken, dass neue Hersteller auf traditionelle, ohnehin gesättigte Märkte drängen.

Die Globalisierung führt also zu einer Erhöhung des Wettbewerbs. Gleichzeitig kommt es zu einer höheren Diversifikation von bekannten und neuartigen Bedarfen. Letztere können aus neuen Technologien oder länderspezifischen Anforderungen resultieren. Um neue wachsende Nischenmärkte zu nutzen, sollen möglichst bekannte und erprobte Produkte mit überschaubarem Aufwand an die speziellen Anforderungen angepasst werden. Weiterhin ist es so möglich, ähnliche Produkte in verschiedenen Märkten anzubieten und dadurch eine Risikostreuung zu erreichen.

Wesentliche *interne Gründe*, die zur Entwicklung von Baukastensystemen führen, sind prozess- oder kostenorientiert. Bei ersteren soll z. B. durch Vereinheitlichung eine Vereinfachung und damit Beschleunigung von Prozessen erreicht werden. Werden die Prozesse

voneinander entkoppelt, so ist eine gleichzeitige Bearbeitung, im Sinne des Concurrent Engineering, oder ein Outsourcing von wenig wertschöpfenden Prozessen möglich. Vereinheitlichte Prozesse können z. B. durch Ausnutzung der Lernkurve oder optimierten Verfahren zu einer Verbesserung der Qualität führen. Diese kann dann wiederum als Wettbewerbsfaktor genutzt werden. Weiterhin kann eine gewisse Flexibilität in der Ressourcenplanung erreicht werden, so dass eine geschickte Disposition zu kürzeren Lieferzeiten führen kann. Weiterhin kann ohne großen Entwicklungsaufwand, z. B. durch Konfiguration, ein weites Produktspektrum angeboten bzw. auf Anfrage können auch individualisierte Produkte mitunter wirtschaftlich angeboten werden.

In der rein kostenorientierten Betrachtung sollen durch Baukastensysteme im Wesentlichen Herstellkosten gesenkt und Skaleneffekte im Einkauf genutzt werden. Außerdem kann eine Verbesserung der Maschinenauslastung insgesamt zu einer Reduzierung der Kosten führen.

Die Entwicklung von Baukastensystemen ist in der Praxis jedoch nicht immer von Erfolg gekrönt. Die Erhöhung der Komplexität durch mehr Varianten stellt Unternehmen vor neue Herausforderungen. Insbesondere methodische und organisatorische Defizite können in der Praxis zu einem Scheitern dieser Ansätze führen.

Häufig wird die Variantenvielfalt im Unternehmen vernachlässigt und nicht transparent dargestellt. Mitarbeiter wissen nicht, welche Baukastensysteme existieren und wie auf schon vorhandene Bausteine zugegriffen werden kann bzw. welche Parameter fest und welche anpassbar sind. Erfolgt die Kostenverrechnung nicht verursachungsgerecht, werden einzelne Baukastenprodukte zu teuer, andere zu günstig angeboten. Erschwert wird dieses durch die zeitliche Differenz der Kostenverursachung und Kostenentstehung. Das gesamte Baukastensystem wird zunächst mit hohem Aufwand entwickelt, anschließend werden einzelne Baukastenprodukte konfiguriert und gefertigt. Ohne eine frühzeitige Abschätzung der Kosten kann ein Baukastensystem insgesamt zu teuer werden. Schließlich fehlen Werkzeuge bzw. werden vorhandene methodische Werkzeuge nicht angewendet, um ein markt- und kostengerechtes Programmkonzept zu entwickeln.

Organisatorische Defizite treten ein, wenn unterschiedliche Bereichssichten nicht koordiniert werden. Beispielsweise muss ein fertigungsoptimales Baukastensystem nicht auch ideal für den Vertrieb sein. Die Entwicklung des Baukastensystems muss als ganzheitlicher Ansatz alle Unternehmensbereiche und den gesamten Produktlebenslauf berücksichtigen. Sind zu viele Stellen innerhalb der Wertschöpfungskette beteiligt, kann die Festlegung eines unternehmensoptimalen Baukastensystems jedoch schwerfallen. Es muss eine geeignete Entscheidungsstruktur im Unternehmen vorhanden sein, die die Priorisierung von abzubildenden Varianten und Bereichssichten vornimmt.

Je nach Unternehmenstyp, Produktportfolio und konkreter Aufgabenstellung können verschiedene Ansätze angewendet werden. Im Wesentlichen unterscheidet man Baureihen, Baukästen, Modulbauweisen und Plattformstrategien. Die Grenzen zwischen den genannten Ansätzen verlaufen schwimmend.

**Tab. 17.1** Vor- und Nachteile von Baureihen

Vorteile für den Hersteller	Vorteile für den Anwender	Als Nachteile für beide ergeben sich
Die konstruktive Arbeit wird für viele Anwendungsfälle nur einmal unter Ordnungsprinzipien geleistet	Preisgünstiges, qualitativ gutes Produkt	Eine eingeschränkte Größenwahl mit nicht immer optimalen Betriebseigenschaften
Die Fertigung von bestimmten Losgrößen wiederholt sich und wird dadurch wirtschaftlicher	Kurze Lieferzeit	
Es ist eher eine hohe Qualität erreichbar	Problemlose Ersatzteilbeschaffung und Ergänzung	

### 17.1.1 Baureihen

Ein wesentliches Mittel zur Rationalisierung im Konstruktions- und Fertigungsbereich ist die Entwicklung von Baureihen (Pahl und Beitz 1974). Unter einer Baureihe versteht man technische Gebilde (Maschinen, Baugruppen oder Einzelteile), die dieselbe Funktion

- mit der gleichen Lösung,
- in mehreren Größenstufen und
- bei möglichst gleicher Fertigung.

in einem weiten Anwendungsbereich erfüllen.

Baureihenentwicklungen können von vornherein vorgesehen sein oder von einem bestehenden Produkt ausgehen, auch wenn dies zunächst mit der Zielsetzung einer Einzellösung entwickelt wurde. Das Wesen einer Baureihenentwicklung besteht darin, dass man von einer Baugröße der zu entwickelnden Baureihe (Maschine, Baugruppe oder Einzelteil) ausgeht und von dieser weitere Baugrößen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten ableitet. Dabei werden der Ausgangsentwurf als Grundentwurf und die abgeleiteten Baugrößen als Folgeentwürfe bezeichnet (Pahl und Beitz 1974). Tabelle 17.1 fasst die Vor- und Nachteile von Baureihen für Hersteller und Anwender zusammen.

Für die Entwicklung von Baureihen sind Ähnlichkeitsgesetze zwingend und dezimalgeometrische Normzahlen zweckmäßig. Sie werden deshalb zunächst als generelle Hilfsmittel erläutert. Anschließend wird ihre Anwendung zur Entwicklung von geometrisch ähnlichen und geometrisch halbähnlichen Baureihen betrachtet.

#### 17.1.1.1 Ähnlichkeitsgesetze

Eine geometrische Ähnlichkeit ist aus Gründen der Einfachheit und Übersichtlichkeit erwünscht. Der Konstrukteur weiß aber, dass technische Gebilde, die rein geometrisch ähnlich vergrößert wurden (sog. Storchenschnabelkonstruktionen) nur in wenigen Fällen befrie-

**Tab. 17.2** Grundähnlichkeiten

Ähnlichkeit	Grundgröße	Invariante
Geometrische	Länge	$\varphi_L = L_1/L_0$
Zeitliche	Zeit	$\varphi_t = t_1/t_0$
Kraft-	Kraft	$\varphi_F = F_1/F_0$
Elektrische	Elektrizitätsmenge	$\varphi_Q = Q_1/Q_2$
Thermische	Temperatur	$\varphi_V = \nu_1/\nu_0$
Photometrische	Lichtstärke	$\varphi_B = B_1/B_0$

digen. Eine rein geometrische Vergrößerung ist nur statthaft, wenn die Ähnlichkeitsgesetze es zulassen, was stets zu überprüfen ist. Ähnlichkeitsgesetze haben ihren Ursprung in der Modelltechnik und können für die Baureihenentwicklung genutzt werden, hier allerdings mit einer anderen Zielsetzung, nämlich

- eine gleich hohe Werkstoffausnutzung
- bei möglichst gleichen Werkstoffen und
- bei gleicher Technologie.

zu erreichen. Daraus folgt, dass bei gleich guter Erfüllung der Funktion die Beanspruchung über weite Größenbereiche gleich bleiben muss.

Von Ähnlichkeit wird gesprochen, wenn das Verhältnis mindestens einer physikalischen Größe beim Grundentwurf und bei den Folgeentwürfen konstant, d. h. invariabel, bleibt. Mit den Grundgrößen Länge, Zeit, Kraft, Elektrizitätsmenge bzw. Stromstärke, Temperatur und Lichtstärke lassen sich Grundähnlichkeiten definieren, s. Tab. 17.2. So ist z. B. geometrische Ähnlichkeit gegeben, wenn stets das Verhältnis aller jeweiligen Längen bei den Folgeentwürfen der Baureihe zum Grundentwurf konstant bleibt. Die Invariante ist der Stufensprung (Längenmaßstab)  $\varphi_L = L_1/L_0$  ( $L_1$  Abmessung des 1. Glieds in der Baureihe (Folgeentwurf),  $L_0$  Abmessung des Grundentwurfs). Für den k-ten Folgeentwurf gilt  $\varphi_{L_k} = \varphi_L^k$ . In derselben Weise lässt sich eine zeitliche, Kraft-, elektrische, thermische und photometrische Ähnlichkeit angeben.

Sind nun mehr als jeweils eine dieser Grundgrößenverhältnisse konstant, kommt man zu speziellen Ähnlichkeiten, die eine besondere Aussage ermöglichen. So spricht man bei gleichzeitiger Invarianz der Länge und Zeit von kinematischer Ähnlichkeit. Sind die Verhältnisse von Länge und Kraft jeweils konstant, hat man statische Ähnlichkeit. Eine sehr wichtige Ähnlichkeit ist das konstante Verhältnis von Kräften bei gleichzeitiger geometrischer und zeitlicher Ähnlichkeit, die sog. dynamische Ähnlichkeit. Je nachdem, welche Kräfte betrachtet werden, kommt man zu verschiedenen Kennzahlen. Daneben ist die thermische Ähnlichkeit wichtig, weil thermische Vorgänge oft begleitend auftreten und ihre Ähnlichkeit mit der dynamischen Ähnlichkeit bei geometrisch ähnlichen Baureihen mit gleich hoher Werkstoffausnutzung nicht in Einklang zu bringen ist.

**Tab. 17.3** Spezielle Ähnlichkeitsbeziehungen

Ähnlichkeit	Invariante	Kennzahl	Definition	Anschauliche Deutung
Kinematische	$\varphi_L, \varphi_t$			
Statische	$\varphi_L, \varphi_t, \varphi_F$	Hooke	$H_0 = \frac{F}{E \cdot L^2}$	Bezogene elastische Kraft
Dynamische	$\varphi_L, \varphi_t, \varphi_F$	Newton	$Ne = \frac{F}{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}$	Bezogene Trägheitskraft
		Cauchy <sup>a</sup>	$Ca = \frac{H_0}{Ne} = \frac{\rho \cdot v^2}{E}$	Trägheitskraft/elastische Kraft
		Froude	$F_r = \frac{v^2}{g \cdot L}$	Trägheitskraft/Schwerkraft
		NN <sup>b</sup>	$\frac{E}{\rho \cdot g \cdot L}$	Elastische Kraft/Schwerkraft
Thermische		Reynolds	$R_e \cdot Re = \frac{L \cdot v \cdot \rho}{\eta}$	Trägheitskraft/Reibungskraft in Flüssigkeiten und Gasen
	$\varphi_L, \varphi_V$	Biot	$Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$	Zu- bzw. abgeföhrte/geleitete Wärmeenergie
	$\varphi_L, \varphi_t, \varphi_V$	Fourier	$Fo = \frac{\lambda \cdot t}{c \cdot \rho \cdot L^2}$	Geleitete/gespeicherte Wärmeenergie

<sup>a</sup>In einigen Veröffentlichungen wird  $C_a = v \cdot \sqrt{\rho/E}$  angegeben. Dies ist dann zweckmäßig, wenn  $C\alpha$  als Geschwindigkeitsverhältnis gelten soll.

<sup>b</sup>nicht benannt

Tabelle 17.3 enthält die für Baureihenentwicklungen mechanischer Systeme wichtigen Ähnlichkeitsbeziehungen. Sie sind keineswegs vollständig, sondern müssen je nach Anwendung ergänzt werden, z. B. für Gleitlagerentwicklungen durch die Sommerfeldzahl oder bei hydraulischen Maschinen durch die Kavitationskennzahl und die Druckziffer.

**Ähnlichkeit bei konstanter Beanspruchung** In maschinenbaulichen Systemen treten Trägheitskräfte (Massenkräfte, Beschleunigungskräfte, Zentrifugalkräfte usw.) und sog. elastische Kräfte aus dem Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang am häufigsten auf. Soll in einer Baureihe die Beanspruchung überall gleich hoch bleiben, muss  $\sigma = \epsilon \cdot E$  konstant sein.

Der Stufensprung der Spannung wird dann  $\varphi_0 = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{\delta_1}{\delta_0} \frac{E_1}{E_0} = 1$ .

Mit gleichem Werkstoff, d.h.  $\varphi_E = E_1/E_2$ , lässt sich dies mit  $\varphi_\epsilon = \epsilon_1/\epsilon_0 = 1$  oder  $\varphi_\epsilon = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_0} \frac{L_0}{L_1} = 1$  bzw.  $\varphi \Delta L = \varphi_L$  erreichen. Mit dieser sog. Cauchy-Bedingung müssen alle Längenänderungen in demselben Stufensprung wie die zugehörigen Längen, d. h. geometrisch ähnlich, wachsen. Andererseits ist dann der Stufensprung einer elastischen Kraft:  $\varphi_{F_E} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \frac{A_1}{A_0} = \varphi_L^2$  mit  $\varphi_\sigma = \varphi_\epsilon \cdot \varphi_E = 1$  und  $\varphi_A = \varphi_L^2$ .

Der Stufensprung der Trägheitskraft ist  $\varphi_{F_T} = \frac{m_1 a_1}{m_0 a_0} = \frac{\rho_1 V_1 a_1}{\rho_0 V_0 a_0}$ . Mit  $\varphi_\rho = \rho_1/\rho_0 = 1$ ,  $\varphi_V = V_1/V_2 = L_1^3/L_0^3 = \varphi_L^3$  und  $\varphi = \frac{L_1 t_0^2}{t_0^2 L_0} = \frac{\varphi_L}{\varphi_t^2}$  wird  $\varphi_{F_T} = \varphi_L^4/\varphi_t^2$ .

Eine dynamische Ähnlichkeit, d. h. konstantes Kräfteverhältnis zwischen Trägheits- und elastischen Kräften bei geometrischer Ähnlichkeit, ist nur zu erreichen, wenn  $\varphi_t = \varphi_L$  wird  $\varphi_{F_E} = \varphi_L^2 = \varphi_{F_T} = \varphi_L^4/\varphi_L^2 = \varphi_L^2$ . Daraus folgt wiederum für den Stufensprung der Geschwindigkeit  $\varphi_V = \varphi_L = \varphi_t = \varphi_L/\varphi_L = 1$ .

**Tab. 17.4** Ähnlichkeitsbeziehungen bei geometrischer Ähnlichkeit und gleicher Beanspruchung: Abhängigkeit häufiger Größen vom Stufensprung der Länge

Mit $Ca = \rho v^2/E = const.$ und bei gleichem Werkstoff, d. h. $\rho = E = const.$ , wird $v = const.$	
Es ändern sich dann unter geometrischer Ähnlichkeit mit dem Stufensprung der Länge	$\varphi_L$
Drehzahlen $n, \omega$	$\varphi_L^{-1}$
Biege- und torsionskritische Drehzahlen $n_{kr}, \omega_{kr}$	
Dehnungen $\varepsilon$ , Spannungen $\sigma$ , Flächenpressung $\rho$ infolge Trägheits- und elast. Kräfte, Geschwindigkeit $v$	$\varphi_L^0$
Federsteifigkeiten $c$ , elastische Verformungen $\Delta L$ infolge Schwerkraft:	$\varphi_L^1$
Dehnungen $\varepsilon$ , Spannungen $\sigma$ , Flächenpressungen $\rho$	
Kräfte $F$	$\varphi_L^2$
Leistung $P$	
Gewichte $G$ , Drehmomente $T$ , Torsionssteifigkeit $c_t$	$\varphi_L^3$
Widerstandsmomente $W, W_t$	
Flächenträgheitsmoment $I, I_t$	$\varphi_L^4$
Massenträgheitsmomente $\theta$	$\varphi_L^5$
Beachte: Werkstoffausnutzung und Istsicherheit sind nur dann konstant, wenn der Größeneinfluss auf den Werkstoffgrenzwert vernachlässigbar ist	

Für alle wichtigen Größen wie Leistung, Drehmoment usw. lassen sich nun unter der Bedingung  $\varphi_L = \varphi_t = const.$  Und  $\varphi_\rho = \varphi_E = \varphi_\sigma = \varphi_V = 1$  entsprechende Stufensprünge bilden, die in Tab. 17.4 zusammengestellt sind. Eine nach diesen Gesetzen entwickelte Baureihe wäre geometrisch ähnlich und hätte bei demselben Werkstoff dieselbe Ausnutzung. Dieses Vorgehen ist überall dort möglich, wo Schwerkraft und Temperaturen keinen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung haben. Zu beachten ist, dass Werkstoffausnutzung und Sicherheit nur dann konstant sind, wenn innerhalb der Stufung der Größeneinfluss auf die Werkstoffgrenzwerte vernachlässigt werden kann.

### 17.1.1.2 Dezimalgeometrische Normzahlreihen

Nach Kenntnis der wichtigsten Ähnlichkeitsbeziehungen stellt sich nun die Frage, wie der jeweilige Stufensprung (Maßstab) zu wählen ist, dem eine Baureihe folgen soll. Hier ist eine dezimalgeometrische Reihe zur Stufung zweckmäßig, da sie dem psychophysischen Grundgesetz von Weber-Fechner entspricht, nach welchem geometrisch gestufte Reize z. B. Schalldrücke, Helligkeiten oder arithmetisch gestufte Empfindungen hervorrufen.

Die dezimalgeometrische Reihe entsteht durch Vervielfachung mit einem konstanten Faktor und wird jeweils innerhalb einer Dekade entwickelt. Der konstante Faktor  $\varphi$  ist der Stufensprung der Reihe und ergibt sich dann zu  $\varphi = \sqrt[n]{a_n/a_0} = \sqrt[10]{10}$ , wobei  $n$  die Stufenzahl innerhalb einer Dekade ist. Für z. B. 10 Stufen würde die Reihe einen Stufensprung  $\varphi = \sqrt[10]{10} = 1,25$  haben und R 10 genannt werden. Die Gliedzahl der Reihe ist  $z = n + 1$ . In Tab. 17.5 ist ein Auszug aus DIN 323 wiedergegeben, in der die Hauptwerte der Normzahlreihen festgelegt sind (DIN 323, Blatt 2 1974). Durch Verwendung der Normmaße nach

**Tab. 17.5** Hauptwerte von Normzahlen. (Auszug aus DIN 323, Blatt 2 1974)

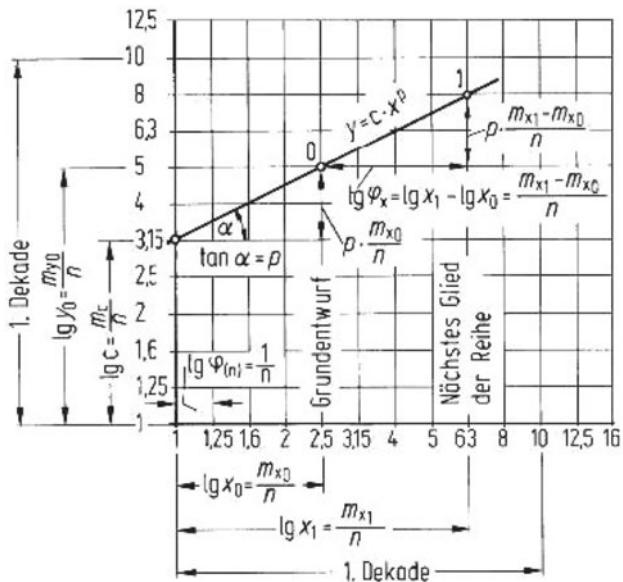
Grundreihen				Grundreihen			
R 5	R 10	R 20	R 40	R 5	R 10	R 20	R 40
1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50
			1,06				2,65
		1,12	1,12			2,80	2,80
			1,18				3,00
1,25	1,25	1,25		3,15	3,15	3,15	
			1,32				3,35
		1,40	1,40			3,55	3,55
			1,50				3,75
1,60	1,60	1,60	1,60	4,00	4,00	4,00	4,00
			1,70				4,25
		1,80	1,80			4,50	4,50
			1,90				4,75
2,00	2,00	2,00		5,00	5,00	5,00	
			2,12				5,30
		2,24	2,24			5,60	5,60
			2,36				6,00

DIN 323 lässt sich die Variantenzahl sehr häufig deutlich reduzieren bei einem erheblich vergleichmäßigen und höheren Bedarf pro Nennmaß.

Die Benutzung der Normzahlreihen weist folgende Vorteile auf (DIN 323, Blatt 2 1974):

- Anpassung an ein bestehendes Bedürfnis, wobei mit einer jeweils anderen Stufung die Größenstufung Bedarfsschwerpunkten (Häufigkeitsverteilungen des Marktbedarfs) angepasst werden kann. Die feineren Reihen weisen nämlich die unveränderten Zahlenwerte der gröberen Reihen auf.
- Reduzierung von Abmessungsvarianten bei Verwendung von Maßen, die auf den Normzahlen basieren und dadurch Aufwand in der Fertigung an Lehren, Vorrichtungen und Messwerkzeugen ersparen.
- Da Produkte und Quotienten von Reihengliedern wieder Glieder einer geometrischen Reihe sind, werden Auslegungen und Berechnungen, die überwiegend aus Multiplikationen und Divisionen bestehen, erleichtert.
- Sind die Abmessungen eines Bauteils oder einer Maschine Glieder einer geometrischen Reihe, so ergeben sich bei linearer Vergrößerung oder Verkleinerung Maßzahlen derselben Reihe, wenn der Vergrößerungs- bzw. Verkleinerungsfaktor ebenfalls der Reihe entnommen ist.
- Selbstständiges Wachsen sinnvoller Größenstufungen, die mit anderen schon vorhandenen oder zukünftigen Reihen verträglich sind.

**Abb. 17.2** Technische Beziehung im NZ-Diagramm:  
n Stufenzahl der feinsten zugrunde gelegten NZ-Reihe:  
jeder Rasterpunkt repräsentiert eine Normzahl dieser Reihe;  
jeder ganzzahliger Exponent (Wachstum) führt wieder auf eine Normzahl



**Darstellung und Größenstufung** Für die weitere Betrachtung ist der Gebrauch des Normzahldiagramms zweckmäßig. Die Normzahlen einer Normzahltreihen lassen sich als Logarithmus auf der Basis 10 durch ihren Exponenten darstellen. Jede dezimalgeometrische Normzahl (NZ) kann also mit  $NZ = 10^{m/n}$  oder wieder mit  $\lg(NZ) = m/n$  geschrieben werden, wobei  $m$  die jeweilige Stufe in der NZ-Reihe und  $n$  die Stufenzahl der NZ-Reihe innerhalb einer Dekade angibt. Andererseits lassen sich fast alle technischen Beziehungen in die allgemeine Form  $y = cx^p$  bringen, deren logarithmische Form  $jgy = lgc + plg x$  ist. Damit ist die technische Beziehung auch durch  $\frac{my}{n} = \frac{mc}{n} = p \frac{mx}{n}$  darstellbar. Trägt man das in einem orthogonalen Netz auf und schreibt man nun nicht den Logarithmus, sondern sogleich deren natürliche Zahlen, erhält man das Normzahldiagramm nach Abb. 17.2. Jede Normzahl einer bestimmten Reihe steht dann mit dem gleichen Abstand (entsprechend dem Stufensprung) an diesem Koordinatennetz. Sind abhängige Größen mit unabhängigen Größen durch ein Potenzgesetz verknüpft  $y = cx^p$ , so können beide Normzahlen nach Normzahltreihen gestuft sein. Entweder mit Exponenten  $p = 1$  mit gleichem Wachstum ( $45^\circ$ -Linie) oder bei  $p \neq 1$  mit verändertem Wachstum (Steigung  $p = 1/2, 2, 3:1$  o.ä.).

In den meisten Fällen wird eine Typisierung mit einmal festgelegten Größenstufen angestrebt. Hierbei ist eine zweckmäßige Größenstufung für Abmessungen und Kenngrößen, z. B. für Leistungen und Drehmomente, von großer Bedeutung. Die Größenstufung richtet sich nach mehreren Gesichtspunkten: Der eine ist von der Marktsituation gegeben, die in der Regel eine kleine Stufung erwartet, um die Kundenforderungen mit einer möglichst zutreffenden Maschinen- oder Gerätgröße erfüllen zu können. Gründe hierfür sind z. B. der Wunsch, keine Überbemessung am Fundament oder den angrenzenden Baugruppen oder Maschinen vornehmen zu müssen, ferner Gewichtsprobleme, Betrieb im Maximum

des Wirkungsgrades, spezielle Eigenschaftsforderungen oder auch ästhetische Aspekte. Der zweite Gesichtspunkt kommt aus der Konstruktion und Fertigung. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen muss hier eine Größenstufung gewählt werden, die einerseits fein genug ist, die technischen Anforderungen (z. B. Wirkungsgrad) erfüllen zu können, die aber andererseits so grob ist, dass die wirtschaftliche Fertigung einer Reihe durch große Stückzahl infolge Typbereinigung ermöglicht wird.

Das Festlegen einer optimalen Größenstufung ist nur bei ganzheitlicher Betrachtungsweise des Systems „Markt – Konstruktion – Fertigung – Vertrieb“ zu lösen. Voraussetzung hierfür sind aussagefähige Informationen über:

- Bedarfserwartungen des Marktes (Vertriebs), bezogen auf die einzelnen Baugrößen,
- Marktverhalten bei Typbereinigung und den damit verbundenen Lücken,
- Fertigungskosten und Fertigungszeiten bei unterschiedlichen Größenstufungen sowie eine genaue Erfassung der sich verändernden Fertigungsgemeinkosten und
- gleichbleibende Eigenschaften der Baureihenglieder bei unterschiedlichen Größenstufungen.

Da sich eine einheitliche optimale Größenstufung wegen der genannten Teilespektre nicht immer ergibt, kann es zweckmäßig sein, den geforderten Größenbereich einer Reihe in mehrere Bereiche unterschiedlicher Größenabstände aufzuteilen.

Definiert man eine Bereichszahl  $B$  als Kennzeichnung eines Größenbereichs zu  $B = \frac{\text{Großes Glied des Größenbereichs}}{\text{Kleinstes Glied des Größenbereichs}} = \varphi^n$  mit  $n$  Anzahl der Größenstufen im jeweiligen Bereich und  $z = n+1$  Gliedzahl des Bereichs, so erhält man den Stufensprung  $\varphi = \sqrt[n]{B}$ . Der Größenbereich kann nach einem konstanten oder veränderlichen Stufensprung aufgeteilt werden, und zwar durch Springen innerhalb und/oder zwischen gröberen und feineren Normzahlreihen (R 5 bis R 40). Beispielsweise kann der untere Teil des Größenbereichs zunächst grob (z. B. entsprechend R 5) und der oberen Teil feiner (z. B.  $\varphi = 1,25$  entsprechend R 10) gestuft werden. Solche degressiv-geometrischen Baureihen wird man anwenden, wenn bei kleinen Baugrößen eine gröbere Stufung wirtschaftlich vertretbar ist, z. B. wegen kleinerer Stückzahlen. Umgekehrt werden progressiv-geometrische Reihen für Bedarfshäufung bei kleineren Größen verwendet.

Als Regel kann gelten, dass eine Größenstufung umso feiner sein muss, je größer der Bedarf ist und je genauer bestimmte technische Eigenschaften eingehalten werden müssen. Wenn es der Markt erfordert, kann angesichts der Gesetzmäßigkeit einer dezimalgeometrischen Baureihe eine andere Stufung ohne konstruktiven Aufwand nachträglich unmittelbar vorgenommen werden. Dabei müssen die Konsequenzen auf der Fertigungsseite beachtet werden.

Bei der Stufung muss man zwischen unabhängigen und abhängigen Größen unterscheiden. Die Aufgabenstellung bestimmt in der Regel, welche Größen als abhängige und welche als unabhängige zu betrachten sind. So kann z. B. die geometrische Stufung der Leistung aus Marktgründen gefordert sein oder die Stufung der Abmessungen nach Normzahlreihen aus fertigungstechnischen Gründen. Es gibt aber auch Funktionszusammenhänge

bei technischen Systemen, wo keine ganzzahlige Potenzabhängigkeit zwischen abhängigen und unabhängigen Funktionsgrößen oder Abmessungen vorliegt. In solchen Fällen können nicht alle Größen geometrisch gestuft sein. Hier muss der Konstrukteur je nach Aufgabenstellung entscheiden, ob er die unabhängigen oder die abhängigen Größen nach Normzahlreihen stuft.

Abweichungen von streng geometrischer Stufung können sich, wie schon erwähnt, aus Fertigungsgesichtspunkten ergeben. So haben Beispiele der Praxis gezeigt, dass es kostengünstiger sein kann, eine arithmetische oder sogar ungleichmäßige Stufung für Bauteilabmessungen vorzusehen, damit in einer Baureihe die im Allgemeinen nicht geometrisch gestuften Halbzeuge besser ausgenutzt oder die Fertigungsvorrichtungen vereinfacht werden. Wenn auch eine Stufung nach Normzahlreihen generell anzustreben ist, so sollte der Konstrukteur sie nicht um jeden Preis anwenden, sondern nach einer Kostenanalyse im Einzelfall entscheiden.

### 17.1.1.3 Geometrisch ähnliche Baureihen

Es wird angenommen, dass ein Grundentwurf mit Werkstoffwahl und nötigen Berechnungen vorliegt. Dabei ist es vorteilhaft, wenn dieser Grundentwurf mit seiner Nenngröße etwa im Mittelfeld der beabsichtigten Baureihe liegt. Der Grundentwurf enthält den Index 0, das erste nächstfolgende Glied der Baureihe (Folgeentwurf) den Index 1, das k-te den Index k.

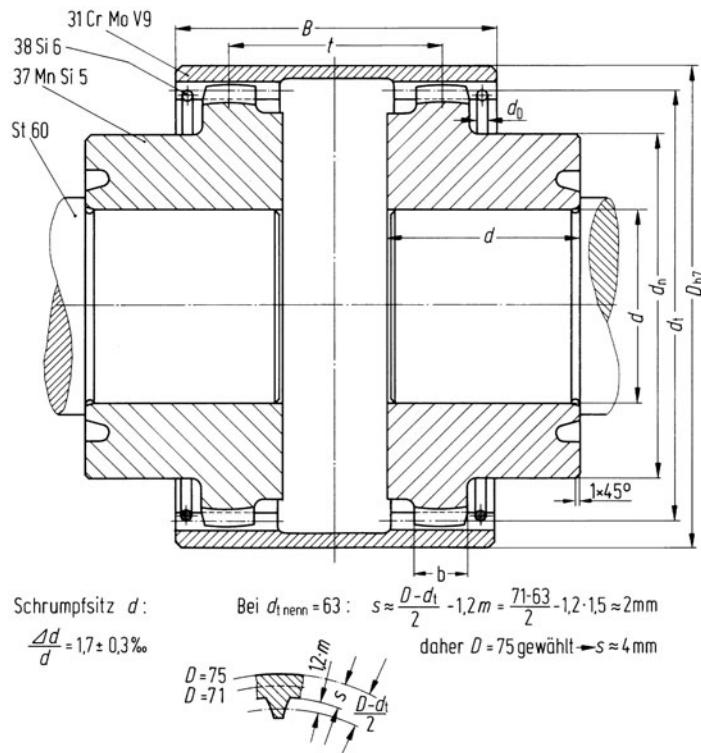
Fast alle technischen Beziehungen lassen sich, wie vorher schon erwähnt, in die allgemeine Form  $y = cx^p$  bringen, deren logarithmische Form  $\lg y = \lg c + p \lg x$  ist.

Alle Abhängigkeiten können als Geraden im Normzahldiagramm (einem doppeltlogarithmischen Diagramm) dargestellt werden, wobei die Steigung dieser Geraden jeweils dem Exponenten  $p$  der technischen Beziehung (Abhängigkeit) entspricht. Jeder Rasterpunkt stellt eine Normzahl dar, der stets von Linien mit ganzzahligen Exponenten getroffen wird. Hat man auf der Abszisse die Nenngröße  $x$  aufgetragen, so ist der Stufensprung  $\varphi_1 = x_1/x_0$ . Bei einer geometrisch ähnlichen Abmessungsreihe ist er gleich dem Stufensprung  $\varphi_L$ . Alle anderen Größen wie Abmessungen, Drehmomente, Leistungen, Drehzahlen usw. ergeben sich bei Kenntnis des Grundentwurfs aus den bekannten Exponenten ihrer physikalischen bzw. technischen Beziehung (s. Tab. 17.4) und können als Gerade mit entsprechender Steigung (z. B. Gewicht:  $\varphi_G = \varphi_G^3$ , also mit Steigung 3:1) eingetragen werden.

Die Hauptabmessungen und Hauptdaten der Baureihe werden so zunächst aus dem Diagramm entwickelt, wie es in den Abb. 17.3 und 17.4 am Beispiel einer Zahnkupplung dargestellt ist.

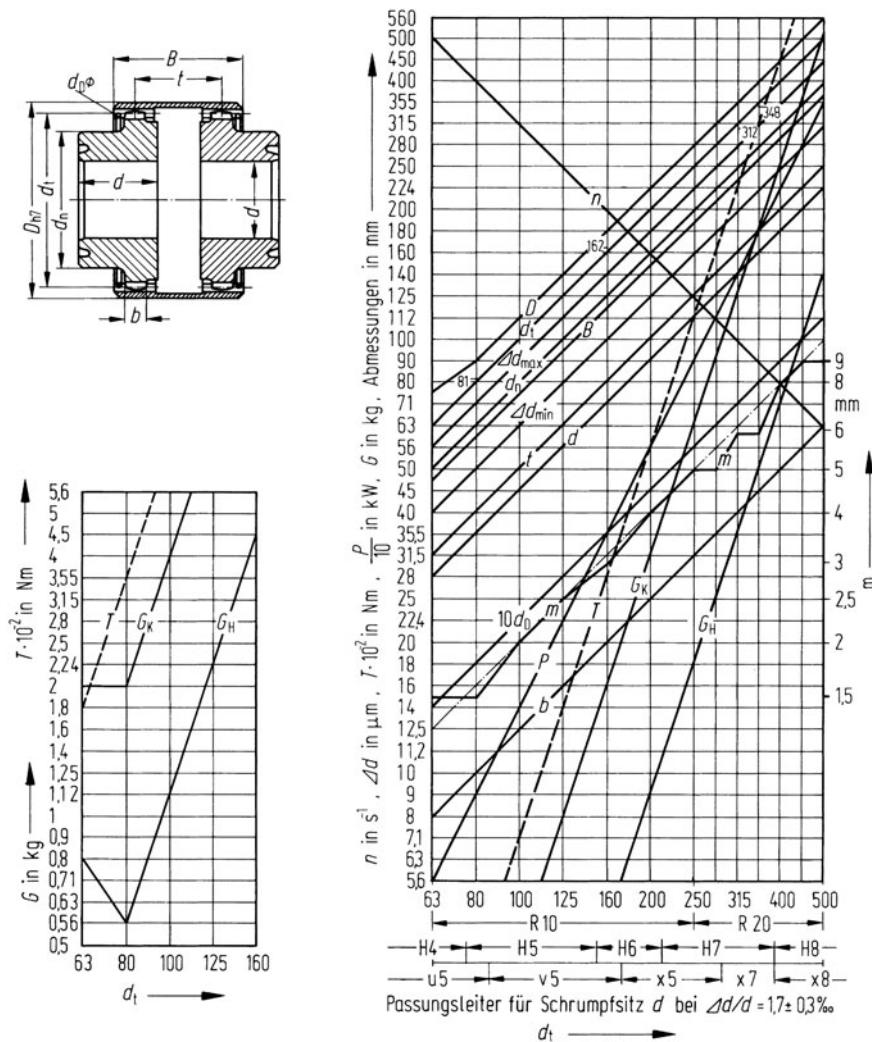
Mit Hilfe eines solchen Datenblatts ist man, vom Grundentwurf ausgehend, in der Lage, für jede Baugröße der Reihe dem Verkauf, dem Einkauf, der Arbeitsvorbereitung und der Fertigung schon wichtige Informationen zu geben, ohne dass weitere Gesamt- oder Einzelteil-Zeichnungen bestehen müssen.

Eine einfache Übertragung der Maße aus den Datenblättern auf Zeichnungen oder sonstige Fertigungsangaben, die erst im Bedarfsfall (Bestellung) angefertigt zu werden brauchen, ist aber erst möglich, wenn mindestens noch folgende Punkte überprüft worden sind:



**Abb. 17.3** Grundentwurf  $dt = 200 \text{ mm}$  für eine Zahnkupplungsreihe mit Werkstoff- und wichtigen Größenangaben

- Passungen und Toleranzen sind mit den Nennmaßen nicht geometrisch ähnlich gestuft, sondern die Größe einer Toleranzeinheit folgt der Beziehung  $i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 D$ , d. h., der Stufensprung der Toleranzeinheit  $i$  folgt im Wesentlichen  $\varphi_i = \varphi_L^{1/3}$ . Infolgedessen muss besonders bei Schrumpf- und Pressverbindungen, aber auch bei funktionsbedingten Spielen an Lagern u. Ä., im Hinblick auf die mit  $\varphi_L$  gehenden, elastischen Verformungen die Toleranz zur Sicherstellung gleicher Funktionsgrenzen angepasst werden, d. h., kleinere Abmessungen bedingen eine höhere, größere Abmessungen erlauben eine niedrigere Qualitätsstufe.
- Technologische Einschränkungen führen oft zu Abweichungen, z. B. kann eine Gusswanddicke nicht unterschritten, eine bestimmte Dicke nicht durchvergütet werden. Hier muss eine Überprüfung in den extremen Größenbereichen vorgenommen werden. Dasselbe gilt für Messränder, Bearbeitungspratzen usw.
- Übergeordnete Normen basieren nicht immer konsequent auf Normzahlen. Durch sie beeinflusste Bauteile müssen entsprechend angepasst werden.

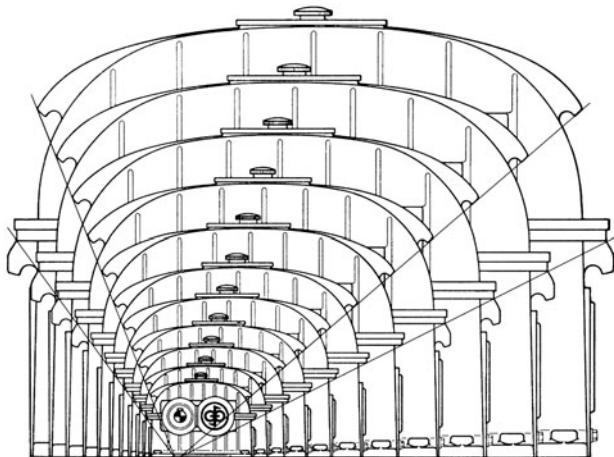


**Abb. 17.4** Datenblatt der Zahnkupplungsreihe über dem Nenndurchmesser,  $d_i$  entsprechend Grundentwurf nach Abb. 17.3. Abmessungen geometrisch ähnlich. Ausnahmen: Hülsenaußendurchmesser D bei der kleinsten Baugröße aus Steifigkeitsgründen, nicht nach Normzahlen gestufte Modulen m und die Forderung nach ganzen, geraden Zähnezahlen, weswegen einige Teilkreisdurchmesser geringfügig angepasst werden mussten. Unter der Abszisse angepasste Passungsfestlegung

- Übergeordnete Ähnlichkeitsgesetze oder andere Anforderungen können eine stärkere Abweichung von der geometrischen Ähnlichkeit erzwingen. Es müssen dann halbähnliche Baureihen vorgesehen werden.

Die nun ermittelten und notwendigen Abweichungen solcher geometrisch ähnlichen Bauarten mit gleicher Ausnutzung werden nach Überprüfung der kritischen Zonen im

**Abb. 17.5** Strahlenfigur zu einer Getriebebaureihe  
(Flender 1972)



Datenblatt eingetragen. Die Fertigungsunterlagen werden dann erst im Bedarfsfall angefertigt. Abbildung 17.5 zeigt als anschauliche bildliche Darstellung das Beispiel einer Strahlenfigur für eine Getriebebaureihe.

#### 17.1.1.4 Halbähnliche Baureihen

Geometrisch ähnliche Baureihen mit dezimal-geometrischer Stufung lassen sich nicht immer verwirklichen. Bedeutende Abweichungen von der geometrischen Ähnlichkeit können durch folgende Gründe erzwungen werden, die für die Baureihe ein anderes Wachstumsgesetz erfordern:

- übergeordnete Ähnlichkeitsgesetze,
- übergeordnete Aufgabenstellung und
- übergeordnete wirtschaftliche Forderungen der Fertigung.

Solche Fälle führen dann zur Entwicklung sog. halbähnlicher Baureihen.

**Übergeordnete Ähnlichkeitsgesetze** Wirken in einer Baureihe Trägheits-, elastische und Gewichtskräfte zugleich und lassen sich letztere nicht vernachlässigen, können die aus der Cauchy-Bedingung hergeleiteten Beziehungen nicht mehr aufrechterhalten werden, weil, wie dargelegt, einerseits Trägheitskräfte und elastische Kräfte bei konstanter Geschwindigkeit vom Stufensprung der Länge mit  $\varphi_{F_T} = \varphi_{F_E} = \varphi_L^2$  abhängen, hingegen die Gewichtskraft mit  $\varphi_{F_G} = \rho_1 g \cdot V_1 / (\rho_0 \cdot g \cdot V_0) = \varphi_\rho \varphi_L^3$  und bei  $\varphi_\rho = 1$ ,  $\varphi_{F_G} = \varphi_L^3$  wächst. Betrachtet man in Tab. 17.3 die entsprechenden Kennzahlen, so erkennt man, dass bei Invarianz aller Werkstoffgrößen und der Geschwindigkeit nur noch die Größe der Länge verbleibt und so bei Größenvariation die betreffende Kennzahl nicht konstant bleiben kann, d. h., das Verhältnis der Kräfte ändert sich und damit bei ähnlichen Querschnitten

auch die Beanspruchung. Es muss also eine von der geometrischen Ähnlichkeit abweichende Anpassung vorgenommen werden. Das ist z. B. im Elektromaschinenbau und bei Fördereinrichtungen der Fall.

Eine entsprechende Problematik ergibt sich bei thermischen Vorgängen. Konstanz des Temperaturverhältnisses  $\varphi_\theta$  ist nur dann gegeben, wenn thermische Ähnlichkeit vorliegt, gleichgültig, ob es sich um quasistationären oder instationären Wärmefluss handelt. Ersterer wird mit der sog. Biot-Zahl beschrieben,  $B_i = \alpha L / \lambda$ , wobei  $\alpha$  die Wärmeübergangszahl und  $\lambda$  die Wärmeleitzahl der von der Wärme beaufschlagten Wand ist. Auch hier ist erkennbar, dass bei annähernd gleichbleibender Wärmeübergangszahl (die Geschwindigkeit bleibt gleich) und bei Stoffkonstanz nur noch die Größe der Länge  $L$  verbleibt, die sich aber in einer Baureihe ändern soll. Infolgedessen kann die thermische Ähnlichkeit sicherstellende Kennzahl nicht unverändert bleiben. Dasselbe gilt für instationär verlaufende Aufheiz- oder Abkühlvorgänge. Beispielsweise wachsen Wärmespannungen, herrührend aus zeitlich veränderlichen Temperaturverteilungen, unter sonst gleichen Bedingungen bei Vergrößerung der Wand quadratisch.

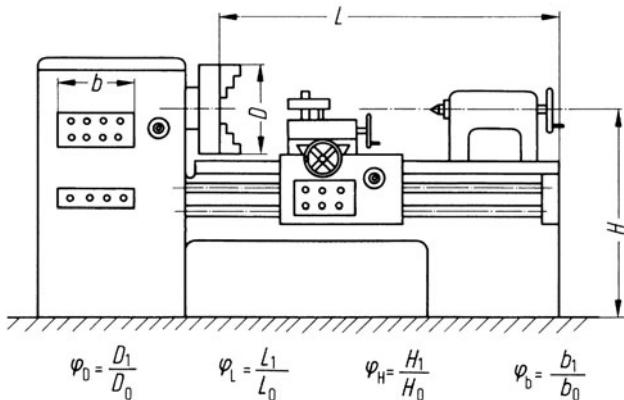
Wird die Funktion einer Maschine oder eines Apparats von physikalischen Vorgängen bestimmt, die nicht durch Trägheits- und elastische Kräfte gekennzeichnet sind, müssen die dann maßgebenden physikalischen Beziehungen zur Ähnlichkeitsbetrachtung herangezogen werden (Gerhard 1984). In einem Gleitlager z. B. wird der Betriebszustand durch die Sommerfeld-Zahl beschrieben. Diese steigt mit der Baugröße, das Lager nimmt eine andere zunehmende relative Exzentrizität ein und erreicht bei einer bestimmten Baugröße möglicherweise die zulässige Schmierspalthöhe. Soll in einem laminar durchströmten Rohr z. B. der Druckverlust konstant bleiben, muss die Geschwindigkeit im Rohr mit der Baugröße wachsen. Dies wiederum könnte zur Folge haben, dass die Reynolds-Zahl soweit steigt, dass man in den Umschlagbereich zur turbulenten Strömung kommt, in dem die obigen Beziehungen ihre Gültigkeit verlieren.

**Übergeordnete Aufgabenstellung** Nicht nur andere Ähnlichkeitsgesetze können eine halbähnliche Baureihe erzwingen, sondern auch eine übergeordnete Aufgabenstellung. Das ist dann der Fall, wenn die Aufgabe Bedingungen enthält, die mit den physikalisch bedingten Ähnlichkeitsgesetzen nicht verträglich sind. Vielfach ergibt sich diese Situation im Zusammenhang zwischen Mensch und Maschine. Alle Bauteile, mit denen der Mensch bei der Arbeit in Berührung kommt, müssen den physiologischen Bedingungen und Körperabmessungen des Menschen entsprechen, z. B. Bedienorgane, Handgriffe, Steh- und Sitzplätze, Überwachungseinrichtungen, Schutzeinrichtungen. Sie können sich im Allgemeinen nicht mit der Nenngröße der Baureihenglieder verändern.

Eine übergeordnete Aufgabenstellung kann aber auch infolge rein technischer Bedingungen vorliegen, indem Eingangs- oder Ausgangsprodukte nicht geometrisch ähnliche Abmessungen haben, z. B. Folien-, Papier- und Druckerzeugnisse.

Abbildung 17.6 zeigt schematisch eine Drehmaschine. Bei ihr treffen beide Fälle zu. Die vom Menschen zu handhabenden Bedienorgane wachsen mit der Baugröße nur bedingt,

**Abb. 17.6** Drehmaschine mit Hauptabmessungen und Bedienelementen, schematisch dargestellt. Anforderungen an die Verhältnisse von Durchmesser/Länge/Höhe ändern sich je nach zu bearbeitender Produktgruppe, also  $\varphi_D = \varphi_L = \varphi_H$  dabei aber möglichst  $\varphi_H \varphi_L = \varphi_b = 1$  aus ergonomischen Gründen



manche bleiben stets gleich groß. Die Arbeitshöhe muss dem Menschen angepasst bleiben. Zugleich bestehen aber auch Anwendungsbereiche mit besonders langer Drehlänge im Vergleich zum Drehdurchmesser. Auch das Umgekehrte, großer Durchmesser bei kleinen Längen, ist denkbar. In solchen Fällen ist dann die Gesamtmaschine stets halbähnlich zu konzipieren, während einzelne Baugruppen, wie Spindelantrieb, Reitstockeinheit usw., in einer geometrisch ähnlichen Reihe entwickelt werden können, die dann baukastenartig auf dem jeweiligen Gestell zur Drehmaschine kombiniert werden.

**Übergeordnete wirtschaftliche Forderungen der Fertigung** Mit der Entwicklung einer Baureihe sucht man bereits eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erzielen. In einer Baureihe selbst, besonders dann, wenn sie relativ fein gestuft werden muss, können Einzelteile und Baugruppen, größer gestuft, eine höhere Stückzahl ergeben und so eine noch wirtschaftlichere Fertigung ermöglichen. Wenn die diese Einzelteile und Baugruppen umgebenden anderen Zonen und selbstverständlich die Funktion es gestatten, kann man in einer an sich feingestuften Baureihe solche Teile größer stufen. Man erhält für die umgebenden oder anschließenden Teile dann halbähnliche Baureihen.

**Anpassen mit Hilfe von Exponentengleichungen** Aus diesen Beispielen geht hervor, dass nicht immer die geometrisch ähnliche Baureihe eingehalten werden kann. Vielmehr muss man unter Beachten des physikalischen Vorgangs und sonstiger Anforderungen mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze Stufensprünge ableiten, die die Abmessungen oder sonstigen Kenngrößen bestimmen. Dabei ist es unter Umständen nicht mehr möglich, eine gleich hohe Ausnutzung der Festigkeit sicherzustellen, sondern man wird dann über der Baureihe die Größe festhalten, die den insgesamt höheren Nutzen bestimmt. Je nach physikalischem Geschehen kann diese Größe sogar über der Größenstufung wechseln. Die jeweilige Anpassung kann sehr vorteilhaft mit Hilfe von Exponentengleichungen vorgenommen werden.

Die sog. Exponentengleichungen sind ein einfaches Hilfsmittel, die erläuterten Bedingungen nach der Art von Ähnlichkeitsbeziehungen zu berücksichtigen und mit ihnen eine halbähnliche Baureihe zu entwickeln. Wie schon dargelegt, liegen fast alle unsere technischen Beziehungen in Potenzfunktionen vor. Für das Wachstumsgesetz ist unter

Verwendung der Normzahldiagramme vom Grundentwurf ausgehend nur der Exponent wichtig.

Die technische Beziehung für das  $k$ -te Glied der Baureihe hat oft die Form  $y_k = c_k x_k^{p_x} z_k^{p_z}$ . Diese abhängig Veränderliche  $y$  und die unabhängig Veränderlichen  $x$  und  $z$  lassen sich stets, von einem Grundentwurf (Index 0) ausgehend, mit Normzahlen ausdrücken:

$$y_k = y_0 \varphi_L^{y_e k}; \quad x_k = x_0 \varphi_L^{x_e k}; \quad z_k = z_0 \varphi_L^{z_e k}$$

mit  $\varphi_L$  der gewählte Stufensprung der als Nennmaß betrachteten gewählten Abmessung in der Baureihe,  $y_0, x_0, z_0$  der entsprechende Wert des Grundentwurfs,  $k$  die jeweils  $k$ -te Stufe,  $y_e, x_e$  und  $c_e$  der zugehörige sog. Stufenexponent. Da  $c_k$  eine Konstante ist, wird für alle Glieder  $c_k=c$ :

$$y_k = y_0 \varphi_L^{y_e k} = c(x_0 \varphi_L^{x_e k})^{p_x} (z_0 \varphi_L^{z_e k})^{p_z} = c x_0^{p_x} z_0^{p_z} \cdot \varphi_L^{(x_e k p_x + z_e k p_z)}.$$

Mit

$$y_0 = c x_0^{p_x} Z_0^{p_z} \quad \text{wird} \quad y_0 \varphi_L^{y_e k} = y_0 \varphi_L^{(x_e k p_x + z_e k p_z)}.$$

Man erhält unabhängig von  $k$  durch Vergleich der Exponenten:

$$y_e = x_e p_x + z_e p_z.$$

Hierin sind  $y_e, x_e$  und  $z_e$  die festzulegenden oder zu ermittelnden Stufenexponenten und  $p_x$  und  $p_z$  die gegebenen physikalischen Exponenten von  $x$  und  $z$ . Man muss nun jeweils den Exponenten  $y_e$  in Abhängigkeit von  $x_e$  und  $z_e$  bestimmen.

Ein Beispiel möge die Handhabung und Anwendung erläutern: Zu einer Baureihe von geometrisch ähnlichen Schiebern soll eine federnde, wärmeelastische Abstützung in einer Rohrleitung nach Abb. 17.7 konzipiert werden. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein:

- Die Federbeanspruchung durch das Schiebergewicht sei über der Reihe konstant,
- die Steifigkeit der Feder soll im gleichen Maße wie die Biegesteifigkeit der Röhre wachsen,
- der mittlere Federdurchmesser  $2R$  ändere sich geometrisch ähnlich mit der Schiebergröße nach dem Nennmaß  $d$ .

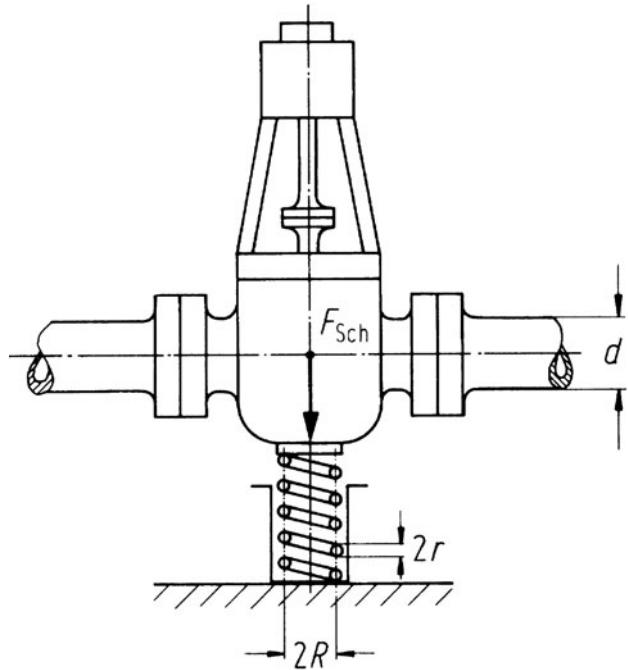
Welchem Gesetz müssen Federdrahtdurchmesser  $2r$  und die federnde Windungszahl  $i_F$  folgen?

Man stellt zuerst die maßgebenden Beziehungen auf und ermittelt daraus die entsprechenden Exponentengleichungen (Index  $e$  zeigt an, dass es sich nur um den Exponenten der entsprechenden Größe handelt):

$$F_{Sch} = Cd^3, \quad (1) \quad F_{Sch_e} = 3d_e \quad (1')$$

$$\tau_F = \frac{F_{Sch}R}{r^3 \pi / 2} \quad (2) \quad \tau_{Fe} = F_{Sch_e} + R_e - 3r_e = 0 \quad (2')$$

**Abb. 17.7** Schieber in Rohrleitung mittels Schraubenfeder wärmeelastisch abgestützt



$$c_F = \frac{Gr^4}{4i_F R^3} \quad (3) \quad cF_e = 4r_e - iF_e - 3R_e \quad (3')$$

Die unabhängige Veränderliche sei  $d$ .

Da die Federbeanspruchung konstant bleiben soll, ist der Stufensprung  $\varphi_t = 1$  und der Stufenexponent von  $\tau_F$  ist  $\tau_{F_e}$ . Die Steifigkeit  $c_F$  der Feder soll der Biegesteifigkeit der Rohre entsprechen. Diese folgt entsprechend Tab. 17.4 mit  $\varphi_c = \varphi_L$ . Da die Bezugsabmessung  $d$  des Schiebers geometrisch wächst, ist  $\varphi_{c_F} = \varphi_d$ , somit wird der Stufenexponent von  $c_F$ :

$$cF_e = d_e \quad (4')$$

Die belastende Federkraft ist gleich dem Schiebergewicht  $F_{Sch}$ , der Stufensprung des Gewichts hängt von der Bezugsgröße  $d$  mit  $\varphi_{F_{Sch}} = \varphi_d^3$  ab. Der Exponent von  $F_{Sch}$ , bezogen auf  $d$ , ist also

$$F_{Sch_e} = 3d_e. \quad (5')$$

Der mittlere Federdurchmesser soll geometrisch ähnlich wachsen, also  $\varphi_R = \varphi_d$  oder

$$R_e = d_e \quad (6')$$

Setzt man die Gln. (5') und (6') ein, ergibt sich

$$3d_e + d_e - 3r_e = 0 \text{ oder } r_e = (4/3)d_e \quad (7')$$

Gln. (4), (6) und (7) in Gl. (3) eingesetzt, ergibt

$$4r_e - iF_e - 3r_e = d_e \text{ oder } iF_e = 4r_e - 3d_e - d_e = 4(4/3)d_e - 3d_e = (4/3)d_e \quad (8')$$

Federdrahtdurchmesser  $2r$  und die federnde Windungszahl  $i_F$  müssen demnach mit den Exponenten  $4/3$  in Abhängigkeit von der Größe  $d$  wachsen. Der Stufensprung ist dann

$$\varphi_r = \varphi_{i_F} = \varphi_d^{4/3}$$

Der Verlauf der einzelnen Größen ist qualitativ im Datenblatt in Abb. 17.8 dargestellt.

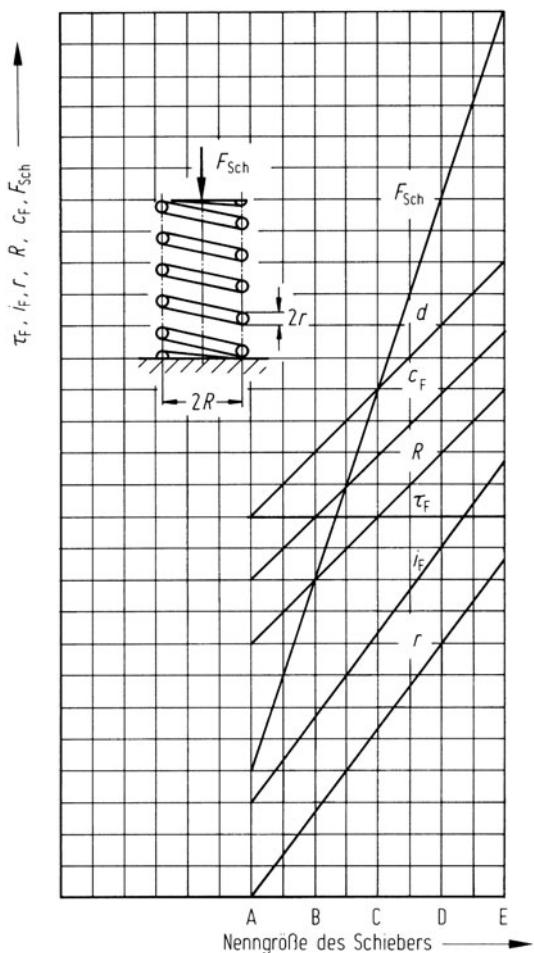
### 17.1.1.5 Entwickeln von Baureihen

Das Vorgehen bei der Baureihenentwicklung wird wie folgt zusammengefasst:

1. Erstellen eines Grundentwurfs, der im Zuge einer beabsichtigten Baureihe entsteht oder von einem bereits bestehenden Produkt stammt.
2. Bestimmen der physikalischen Abhängigkeiten (Exponenten) nach Ähnlichkeitsgesetzen für im Wesentlichen geometrisch ähnliche Baureihen oder mit Hilfe von Exponentengleichungen bei halbähnlichen Baureihen, wenn entsprechende übergeordnete Bedingungen bestehen. Darstellen der Ergebnisse im Normzahldiagramm in Form von Datenblättern.
3. Festlegen der Größenstufungen und des Anwendungsbereichs in den Datenblättern.
4. Anpassen der theoretisch gewonnenen Reihe an übergeordnete Normen oder technologische Bedingungen und Darstellen der Abweichungen in den Datenblättern.
5. Überprüfen der Baureihe durch Erarbeiten maßstäblicher Entwürfe von Baugruppen oder von kritischen Zonen für extreme Baugrößen.
6. Verbessern und Vervollständigen der Unterlagen, soweit sie zur Festlegung der Reihe und zur Erstellung nötig werdender Fertigungsunterlagen erforderlich sind.

Es kann sein, dass die Notwendigkeit einer halbähnlichen Baureihe nicht aus der Anforderungsliste oder aus der ersten Betrachtung physikalischer Abhängigkeiten zu erkennen ist und sich daher erst im Laufe der Entwicklung ergibt. Bei der Entwicklung von halbähnlichen Baureihen mit Hilfe von Exponentengleichungen sind die Wachstumsgesetze der einzelnen Komponenten bzw. Abmessungen zu bestimmen. Bei komplexen Anwendungen ist die Zahl der beteiligten Parameter schon recht groß und die Zahl der zu lösenden Gleichungen entsprechend hoch. Die Übersichtlichkeit wird dadurch stark vermindert. Durch rechnerunterstützte Hilfsmittel können diese Beziehungen halbautomatisch ausgewertet und bei geschickter Wahl der Parametrisierung des Grundentwurfs im CAD-System die Folgeentwürfe abgeleitet werden.

**Abb. 17.8** Datenblatt für halbähnliche Schraubenfeder nach Abb. 17.7 Erläuterungen vgl. Text

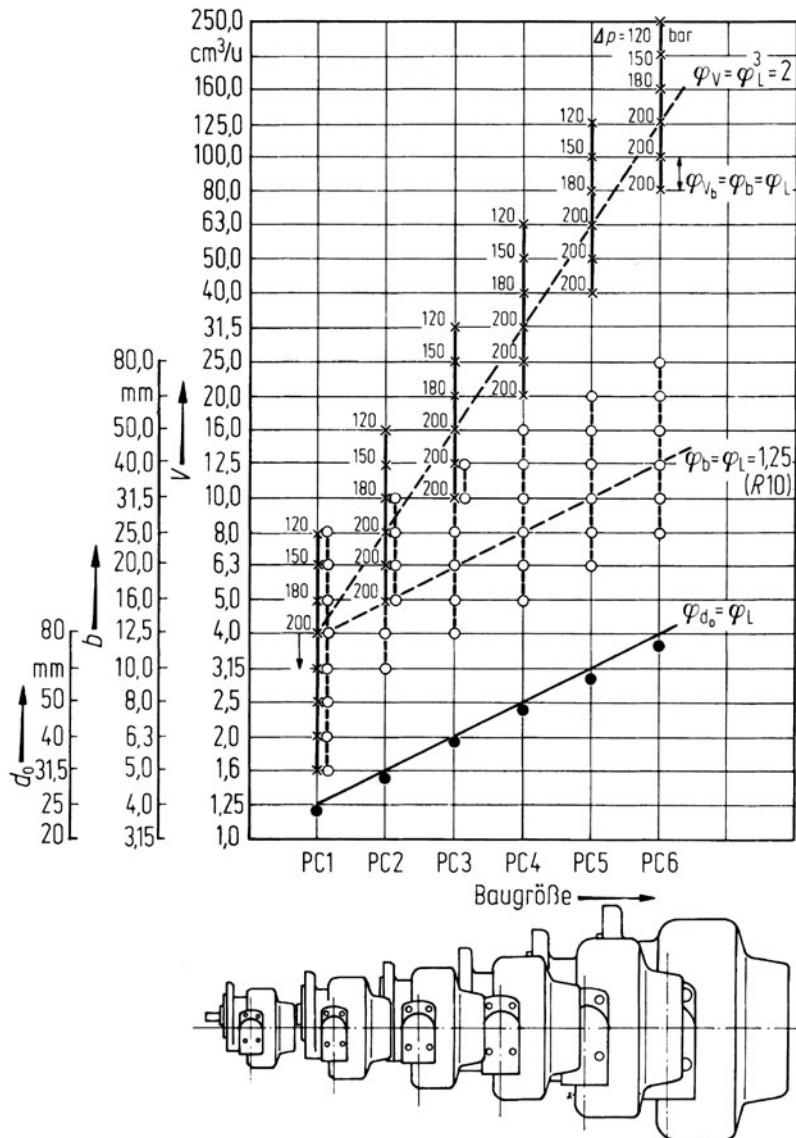


#### 17.1.1.6 Beispiel

Eine Baureihe für Hochdruck-Zahnradpumpen soll mit sechs Baugrößen einen Fördervolumen-Bereich von 1,6 bis 250 cm<sup>3</sup>/U bei einem maximalen Betriebsdruck von 200 bar und einer konstanten Antriebsdrehzahl von 1.500 U/min abdecken. In Abb. 17.9 sind für die sechs Baugrößen die festgelegten Größenstufen für die Fördervolumina, die Teilkreisdurchmesser der Zahnräder sowie die Zahnradbreiten im Normzahldiagramm (Datenblatt) zusammengestellt.

Folgende Verhältnisse liegen vor:

Die Teilkreisdurchmesser  $d_0$  der Baugrößen (für jede Baugröße ein konstanter Durchmesser) sind nach der Normzahlreihe R 10 mit einem Stufensprung  $\varphi_{d_0} = 1,25$  festgelegt, wobei die Größen geringfügig von den Normzahlwerten abweichen. Dies ist eine Folge



**Abb. 17.9** Datenblatt einer Baureihe für Hochdruck-Zahnradpumpen.  $v$  geometrisches Fördervolumen pro Umdrehung,  $b$  Zahnradbreite,  $d_o$  Teilkreisdurchmesser der Zahnräder (Werksangaben der Fa. Reichert, Hof)

der konstanten, ganzzahligen Zähnezahl und der von der Reihe R 10 etwas abweichenden Normwerte der Module  $m$ .

Das sich aus der Zahngometrie ergebende Fördervolumen pro Umdrehung ist  $V = 2\pi d_0 m b$  ( $b$  Zahnradbreite). Von Baugröße zu Baugröße wächst bei geometrischer

Ähnlichkeit das Fördervolumen also mit, d. h., das Fördervolumen verdoppelt sich von Stufe zu Stufe. Die Pumpenleistung  $P = \Delta p V$  ergibt sich mit dem Stufensprung  $\varphi_V = \varphi_{d_0} \varphi_m \varphi_b = \varphi_L^3 = 1,25^3 = 2$  soweit mit  $\varphi_{\Delta p} = 1$  und  $\varphi_t = 1$  zu  $\varphi_P = \varphi_V = 2$ . Wegen der konstanten Drehzahl stuft sich das Drehmoment entsprechend.

Je Baugröße bzw. je Zahnraddurchmesser  $d_0$  sind sechs Zahnradbreiten  $b$  vorgesehen, in der kleinsten Baugröße sogar acht, damit eine feinere Stufung der Fördervolumina erreicht wird. Das bedeutet, innerhalb jeder Baugröße (Teilbereich) wachsen die geometrischen Fördervolumina  $V = 2\pi d_0 m b$  wegen des konstanten  $d_0$  und  $m$  sowie der gewählten Zahnradbreiten-Stufung  $\varphi_b = 1,25$  (R 10) mit einem Stufensprung  $\varphi_{vb} = \varphi_b = 1,25$ . Die Leistungsstufung innerhalb einer Baugröße beträgt dann mit den bekannten Beziehungen  $\varphi_{Pe} = \varphi_{vb} = \varphi_b = 1,25$ .

Damit bei gleichem Wellendurchmesser die mechanischen Beanspruchungen infolge der steigenden Drehmomente und der mit der Zahnradbreite zunehmenden Biegemomente beherrscht werden können, werden die letzten drei Glieder mit den größeren Breiten zu jeder Baugröße im zulässigen Druck nach unten gestuft. Aus übergeordneten wirtschaftlichen Fertigungsgesichtspunkten (gleicher Wellendurchmesser, gleiche Lager) werden also die ersten zwei Glieder mit den kleineren Breiten zu jeder Baugröße festigkeitsmäßig nicht voll ausgenutzt. Für die letzten drei Glieder ist durch Druckabsenkung eine Belastungsanpassung vorgesehen. Die Fördervolumina der einzelnen Baugrößen überlappen einander jeweils um drei Größen. Für den gesamten Fördervolumenbereich steht dadurch eine geschlossene 200-bar-Reihe zur Verfügung.

Die vorliegende Baureihe wurde also als halbähnliche Reihe mit wenigen Gehäusegrößen und mehreren Zahnradbreitenstufen je Gehäuse (Baugröße) konzipiert, damit bei gleicher Antriebsdrehzahl und gleichem Druck für den Gesamtbereich („übergeordnete Aufgabenstellung“) sowie bei konstanter Zahngroße, konstantem Zahnrad- und Wellendurchmesser je Gehäusegröße („übergeordnete wirtschaftliche Forderung der Fertigung“) ein möglichst großer Fördervolumen-Bereich realisierbar wird.

### 17.1.2 Baukästen

Die Baureihenentwicklung ist ein Rationalisierungsansatz für Produktentwicklungen, bei denen dieselbe Funktion mit dem gleichen Lösungskonzept und möglichst gleichen Eigenschaften für einen breiteren Größenbereich zu erfüllen ist. Baukastensysteme bieten für eine andere Situation Rationalisierungsmöglichkeiten. Müssen von einem Produktprogramm bei einer oder mehreren Größenstufungen verschiedene Funktionen erfüllt werden, so ergibt das bei der Einzelkonstruktion eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte, was einen entsprechend großen konstruktiven und fertigungstechnischen Aufwand bedeutet. Die Rationalisierung liegt nun darin, dass die jeweils geforderte Funktionsvariante durch Kombination festgelegter Einzelteile und/oder Baugruppen (Funktionsbausteine) aufgebaut wird. Eine solche Kombination wird durch Anwendung des Baukastenprinzips realisiert.

Unter einem Baukasten versteht man Maschinen, Baugruppen und Einzelteile, die

- als Bausteine mit oft unterschiedlichen Lösungen durch Kombination
- verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen.

Durch mehrere Größenstufen solcher Bausteine enthalten Baukästen oft auch Baureihen. Die Bausteine sollen dabei nach möglichst ähnlicher Technologie gefertigt werden. Da sich in einem Baukastensystem die Gesamtfunktion durch die Kombination diskreter Funktionsbausteine ergibt, muss zu einer Baukastenentwicklung eine entsprechende Funktionsstruktur erarbeitet werden. Damit wird die Konzept- und Entwurfsphase viel stärker beeinflusst als bei einer reinen Baureihenentwicklung.

Ein Baukastensystem wird sich gegenüber Einzellösungen immer dann als technisch-wirtschaftlich günstig anbieten, wenn alle oder einzelne Funktionsvarianten eines Produktprogramms nur in kleineren Stückzahlen zu liefern sind und wenn es gelingt, das geforderte Spektrum durch einen oder nur wenige Grundbausteine und Zusatzbausteine zu realisieren.

Neben der Erfüllung unterschiedlicher Funktionen können Baukastensysteme auch zur Losgrößenerhöhung von Gleichteilen dienen, indem sie in mehreren Produkten die Verwendung gleicher Bausteine ermöglichen. Dieses besonders der Fertigungs rationalisierung dienende Ziel wird durch eine Elementarisierung der Produkte in bausteinartige Einzelteile erreicht (vgl. Differentialbauweise). Welches der beiden Ziele im Vordergrund steht, hängt stark vom Produkt und von den zu erfüllenden Aufgaben ab. Bei einem großen Spektrum der Gesamtfunktion ist vor allem eine funktionsorientierte Gliederung des Produkts in Funktionsbausteine wichtig, bei einer nur kleinen Zahl von Gesamtfunktionsvarianten steht dagegen eine fertigungsorientierte Gliederung in Fertigungsbausteine im Vordergrund.

Oft erfolgt eine Baukastenentwicklung erst dann, wenn von einem zunächst in Einzel- oder Baureihenkonstruktion entwickelten Produktprogramm oder auch einer Baugruppe im Laufe der Zeit so viele Funktionsvarianten verlangt werden, dass ein Baukastensystem wirtschaftlich ist. Dabei wird ein bereits auf dem Markt befindliches Produktprogramm zu einem späteren Zeitpunkt in ein Baukastensystem umkonstruiert. Das hat den Nachteil, dass man zu einem gewissen Grade schon festgelegt ist, zum anderen den Vorteil, dass zunächst das Produkt mit seinen wesentlichen Eigenschaften erprobt worden ist, ehe mit einer aufwändigen Baukastenentwicklung begonnen wird.

Die Erfahrung zeigt, dass mit Baukastensystemen vor allem die Gemeinkosten (Personalaufwand und -kapazität) reduziert werden können, weniger Material- und auch Fertigungslohnkosten, da das Baukastenprinzip zu Gewichts- und Volumenvergrößerungen an Bausteinen und damit Ausführungsvarianten gegenüber der Einzelausführung führen kann. Wird ein Baukastensystem mit dem Ziel entwickelt, dass jede Funktionsvariante kostengünstiger sein soll als ein für diese Aufgabenstellung speziell entwickeltes Produkt, kann man sich den Entwicklungsaufwand sparen. Ein Baukastensystem kann nur als Gesamtsystem günstiger sein als eine den Gesamtfunktionsvarianten entsprechende Anzahl von Einzelausführungen.

**Tab. 17.6** Vorteile von Baukastensystemen

Vorteile für den Hersteller	Vorteile für den Anwender
Für Angebote, Projektierung und Konstruktion stehen bereits fertige Ausführungsunterlagen zur Verfügung. Der Konstruktionsaufwand wird nur einmalig vorab nötig, was hinsichtlich der erforderlichen Vorleistung ein Nachteil sein kann	Kurze Lieferzeit
Auftragsgebundener Konstruktionsaufwand entsteht nur für nicht vorhersehbare Zusatzeinrichtungen	Bessere Austausch- und Instandsetzungsmöglichkeiten, dadurch kürzere Wartungszeiten
Kombinationsmöglichkeit mit Nichtbausteinen, vereinfachte Arbeitsvorbereitung und bessere Fertigungsterminsteuerung sind möglich	Besserer Ersatzteildienst
Auftragsabwicklung im Konstruktions- und Fertigungsbereich kann mit Hilfe bausteinbedingter Parallelfertigung stark gekürzt werden, außerdem schnelle Lieferbereitschaft	Spätere Funktionsänderungen und Erweiterungen im Rahmen des Variantenspektrums (Rekonfiguration)
Eine DV-unterstützte Auftragsabwicklung wird erleichtert	Fehlermöglichkeiten durch ausgereifte Gestaltung fast ausgeschlossen
Einfache Kalkulation und Preisfindung möglich	
Bausteine können auftragsunabhängig in optimalen Losgrößen gefertigt werden, was z. B. zu kostengünstigeren Fertigungsmitteln und -verfahren führen kann	
Für zugekaufte Bausteine lassen sich durch höhere Stückzahlen bessere Einkaufskonditionen aushandeln	
Günstige Montagebedingungen infolge zweckmäßigerer Baugruppenunterteilung	
Einsatzmöglichkeiten der Baukastentechnik in verschiedenen Konkretisierungsstufen des Produktionsprozesses, so bei der Zeichnungs- und Stücklistenerstellung, also im Konstruktionsbereich, bei der Aufstellung von Arbeitsplänen, bei der Beschaffung von Rohteilen und Halbzeugen, bei der Teilefertigung bis hin zur Montage sowie auch beim Vertrieb	

In Tab. 17.6 sind zusammenfassend Vorteile angegeben, die sich bei der Verwendung von Baukästen für den Hersteller und den Anwender ergeben können. Je nach Zielsetzung und Aufbau des Baukastens sind die verschiedenen Vorteile unterschiedlich stark ausgeprägt.

In Tab. 17.7 sind zusammenfassend Nachteile angegeben, die sich bei der Verwendung von Baukästen für den Hersteller und den Anwender ergeben können. Für den Hersteller ist im Allgemeinen die Grenze eines Baukastensystems erreicht, wenn die Unterteilung in Bausteine zu technischen Mängeln und wirtschaftlichen Einbußen führt.

**Tab. 17.7** Nachteile von Baukastensystemen

Nachteile für den Hersteller	Nachteile für den Anwender
Eine Anpassung an spezielle Kundenwünsche ist nicht so weitgehend möglich wie bei Einzelkonstruktionen (Verlust der Flexibilität und Marktorientierung)	Spezielle Wünsche des Anwenders sind schwer erfüllbar
Der Konstruktionsaufwand wird in größerem Umfang einmalig vorab notwendig. Häufig werden deshalb bei festgelegter Baustuktur die Werkstatt-Zeichnungen erst bei Auftragseingang angefertigt. So vervollständigt sich der Zeichnungsbestand eines Bauprogramms allmählich	Bestimmte Qualitätsmerkmale können ungünstiger liegen als bei Einzelausführungen
Produktänderungen sind nur in größeren Zeiträumen wirtschaftlich vertretbar, da die einmaligen Entwicklungskosten hoch sind	Wegen der z. T. höheren Gewichte und Bauvolumina als bei einem speziell für die Funktionsvariante entwickelten Produkt steigen u. U. Platzbedarf und Fundamentkosten
Technische Formgebung wird stärker als bei Einzelausführungen von der Bausteingestaltung und dem Auflösungsgrad bestimmt	
Teilweise ist eine Überdimensionierung von Bauteilen und Schnittstellen notwendig, um z. B. den größten Baustein anschließen zu können. Dadurch kann sich das Gewicht erhöhen und das Volumen vergrößern. Resultierende Mehrkosten können nicht an den Kunden weitergegeben werden	
Erhöhter Fertigungsaufwand, z. B. an Passflächen. Fertigungsqualität muss höher liegen, da eine Nacharbeit ausgeschlossen ist	
Erhöhter Montageaufwand und größere Sorgfalt sind erforderlich	
Da nicht nur die Gesichtspunkte des Herstellers, sondern auch die des Anwenders herangezogen werden müssen, ist in vielen Fällen das Festlegen eines optimalen Baukastensystems schwer	
Die Komplexität des Produktprogramms kann durch eine Vielzahl von Relationen zwischen den Bausteinen erhöhen. Dadurch kann es notwendig werden, durch Rechnerhilfsmittel, wie Konfiguratoren, die Komplexität zu organisieren	
Seltene Kombinationen im Rahmen des Baukastenprogramms zur Erfüllung ausgefallener Gesamtfunktionsvarianten können kostenmäßig ungünstiger sein als eine eigens für diese Aufgabenstellung durchgeführte Einzelausführung	

Baukastensysteme können nach verschiedenen Gesichtspunkten unterschieden werden, die die Eigenschaften des Baukastensystems als Ganzes beeinflussen. Eine Zusammenfassung der von verschiedenen Autoren stammenden Gesichtspunkte ist einer Aufstellung (Stechert 2010a) folgend in Tab. 17.8 wiedergegeben.

### 17.1.2.1 Baukastensystematik

Baukastensysteme sind aus Bausteinen aufgebaut, die lösbar oder unlösbar zusammengefügt sind. Zunächst wird zwischen Funktionsbausteinen und Fertigungsbausteinen unterschieden. Funktionsbausteine sind unter dem Gesichtspunkt der Erfüllung technischer Funktionen festgelegt, so dass sie diese von sich aus oder in Kombination mit anderen erfüllen können. Fertigungsbausteine sind solche, die unabhängig von ihrer Funktion nach reinen fertigungstechnischen Gesichtspunkten festgelegt werden. Zur Ordnung von Funktionsbausteinen bietet sich an, diese nach bei Baukastensystemen immer wiederkehrenden Funktionsarten zu orientieren und zu definieren, die als Teifunktionen kombiniert, unterschiedliche Gesamtfunktionen (Gesamtfunktionsvarianten) erfüllen. In Abb. 17.10 wird deshalb eine Ordnung für solche in Betracht kommenden Funktionen vorgeschlagen.

*Grundfunktionen* sind in einem System grundlegend, immer wiederkehrend und unerlässlich. Sie sind grundsätzlich nicht variabel. Eine Grundfunktion kann zur Erfüllung von Gesamtfunktionsvarianten allein auftreten oder mit anderen Funktionen verknüpft werden. Sie wird durch einen Grundbaustein verwirklicht, der in einer oder mehreren Größenstufen sowie ggf. in verschiedenen Bearbeitungsstufen ausgeführt sein kann. Solche Grundbausteine sind in der Baustuktur des Baukastensystems als „Muss-Bausteine“ enthalten.

*Hilfsfunktionen* sind verbindend und anschließend und werden durch Hilfsbausteine erfüllt, die sich im Allgemeinen als Verbindungs- und Anschlusselemente darstellen. Hilfsbausteine müssen entsprechend den Größenstufen der Grundbausteine und der anderen Bausteine entwickelt werden und sind in der Baustuktur meistens Muss-Bausteine.

*Sonderfunktionen* sind besondere, ergänzende, aufgabenspezifische Teifunktionen, die nicht in allen Gesamtfunktionsvarianten wiederkehren müssen. Sie werden durch Sonderbausteine erfüllt, die zum Grundbaustein eine spezielle Ergänzung oder ein Zubehör darstellen und daher Kann-Bausteine sind.

*Anpassfunktionen* sind zum Anpassen an andere Systeme und Randbedingungen notwendig. Sie werden stofflich durch Anpassbausteine verwirklicht, die nur zum Teil bereits maßlich festgelegt sind und noch im Einzelfall aufgrund nicht vorhersehbarer Randbedingungen in ihren Abmessungen angepasst werden müssen. Anpassbausteine treten als Muss-oder Kann-Bausteine auf.

Nicht im Baukastensystem vorgesehene auftragsspezifische Funktionen werden trotz sorgfältiger Entwicklung eines Baukastensystems immer wieder vorkommen. Solche Funktionen werden über *Nichtbausteine* verwirklicht, die für die konkrete Aufgabenstellung in Einzelkonstruktion entwickelt werden müssen. Ihre Verwendung führt zu einem Mischsystem als Kombination von Bausteinen und Nichtbausteinen.

**Tab. 17.8** Unterscheidungsmerkmale von Baukastensystemen*Wahrnehmung durch den Benutzer*

Herstellerbaukasten	Der Baukastencharakter liegt nur vor und während der Herstellung vor. Der Anwender kann das Baukastenprodukt nachträglich nicht mehr verändern
Anwenderbaukasten	Der Baukastencharakter ist auch dem Anwender bewusst. Er kann das Produkt selbst konfigurieren und ggf. rekonfigurieren
<i>Verflechtung</i>	
Horizontale Verflechtung	Derselbe Baustein wird in mehreren unterschiedlichen Baukastensystemen verwendet
vertikale Verflechtung	Ein Baustein des Baukastensystems ist auf untergeordneter Ebene selbst als Baukasten aufgebaut, d. h., er kann wiederum in einzelne Bausteine zerlegt werden
<i>Ausdehnung</i>	
Lieferantenbaukasten	Ein Lieferant konfiguriert seine Produkte derart, dass ein individuelles Produkt je Anwender geliefert werden kann
OEM-Baukasten	Baukastensysteme, die innerhalb der Grenzen eines OEM eingesetzt werden
Industriebaukasten	Baukastensysteme, die von verschiedenen OEM gemeinsam entwickelt und zur Konfiguration ihrer Produkte verwendet werden
<i>Konkretisierungsgrad</i>	
Abstrakte Baukastensysteme	Das Baukastensystem setzt sich aus abstrakten Bausteinen zur Unterstützung der Auftragsabwicklung auch in nichtproduzierenden Unternehmensbereichen zusammen, z. B. Fertigungsteilprozesse oder CAD-Modelle
Konkrete Baukastensysteme	Das Baukastensystem setzt sich aus konkreten Bausteinen, d. h. gefertigten Bauteilen oder Baugruppen, zusammen
<i>Reinheit</i>	
Reinsystem	Das Baukastenprodukt wird ausschließlich aus Bausteinen zusammengesetzt
Mischsystem	Das Baukastenprodukt wird aus Bausteinen und Nicht-Bausteinen zusammengesetzt, z. B. um auftragsspezifische Besonderheiten abzudecken
<i>Nutzungsdauer</i>	
Baukasten mit zeitweiliger Nutzung der Produkte	Bei dieser Art der Baukastensysteme werden Produkte aus dem Baukasten konfiguriert, über einen begrenzten Zeitraum genutzt und anschließend zerlegt. Die Bausteine werden dem Baukasten ggf. zurückgeführt und ein neues Produkt (re)konfiguriert
Baukasten mit dauernder Nutzung der Produkte	Ein Produkt wird einmalig aus dem Baukasten konfiguriert und am Ende der Nutzungsdauer der Entsorgung zugeführt
Anpassungsfähigkeit	Anpassung in Abmessungen Anpassung an wechselnde Aufgaben

**Tab. 17.8** (Fortsetzung)

	Anpassung in der Anordnung
	Anpassung an Drehzahl, Drehmoment, Kraft oder Geschwindigkeit
<i>Systemabgrenzung</i>	
Offene Systeme	Offene Baukastensysteme sind durch theoretisch uneingeschränkte Variations- und Kombinationsmöglichkeiten und damit eine auftragsspezifische Konfigurierbarkeit charakterisiert (z. B. Ziegelsteine). Zur Darstellung existieren Baumusterpläne mit Anwendungsbeispielen
Geschlossene Systeme	Ein geschlossenes Baukastensystem ist durch seine endlichen, festgelegten Kombinationsmöglichkeiten gekennzeichnet (z. B. Fahrrad). Die Darstellung des Systems erfolgt durch ein Bauprogramm
<i>Position des Bausteins in der Produktstruktur</i>	
Strukturgebundene Baukastensysteme	Die verschiedenen Ausführungen eines Bausteins können nur an einer bestimmten Position in der Produktstruktur eingesetzt werden
Modulare Baukastensysteme	Ein Baustein kann an verschiedenen Positionen in der Produktstruktur in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt werden

Unter der Bedeutung eines Bausteins wird eine Rangordnung innerhalb eines Baukastensystems verstanden. So sind bei Funktionsbausteinen Muss-Bausteine und Kann-Bausteine (Eversheim und Wiendahl 1971) Gliederungen in diesem Sinne.

Ein fertigungsorientiertes Merkmal ist die Komplexität der Bausteine. Hierbei wird zwischen Großbausteinen, die als Baugruppe noch in weitere Fertigungsteile zerlegbar sind, und Kleinbausteinen unterschieden, die bereits Werkstücke darstellen.

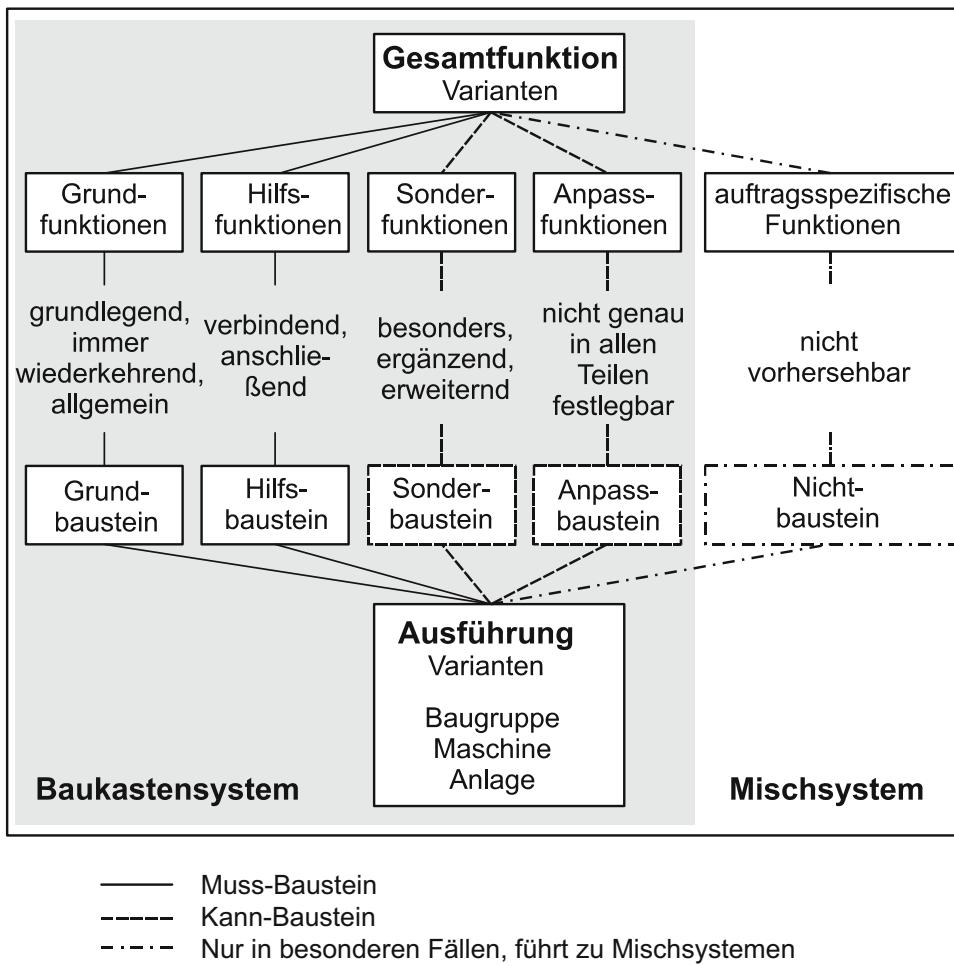
Ein weiterer Gesichtspunkt einer Baukastenkennzeichnung ist die Kombinationsart der Bausteine. Angestrebt wird die fertigungstechnisch günstige Kombination nur gleicher Bausteine. Praxis ist aber die Kombination gleicher und verschiedener Bausteine sowie die Kombination mit auftragsspezifischen Nichtbausteinen. Letztere erfüllen als Mischsysteme marktseitige Anforderungen recht wirtschaftlich.

Zur Kennzeichnung von Baukastensystemen ist weiterhin ihr Auflösungsgrad geeignet. Er bestimmt für einen Baustein den Grad der funktions- und/oder fertigungsbedingten Aufgliederung in Einzelteile. Bezogen auf den gesamten Baukasten beschreibt er die Anzahl der beteiligten Bausteine und ihre Kombinationsmöglichkeiten.

In Tab. 17.9 sind die genannten Begriffe einer Baukastensystematik zusammengefasst

### 17.1.2.2 Vorgehen beim Entwickeln von Baukästen

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Entwicklung von Baukastensystemen anhand konkreter Arbeitsschritte dargelegt.

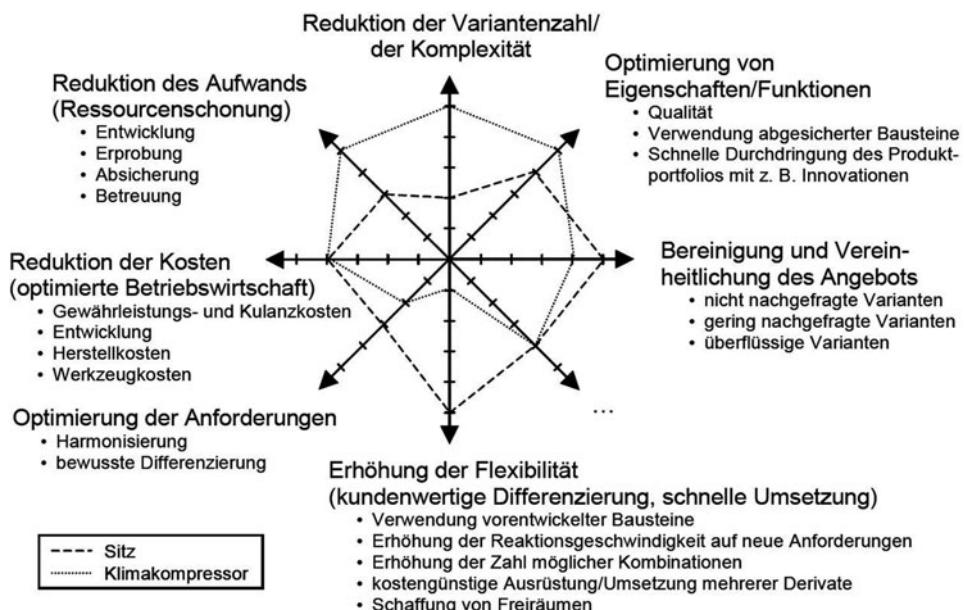


**Abb. 17.10** Funktions- und Bausteinarten bei Baukasten- und Mischsystemen

**Klären der Aufgabenstellung** Bevor die eigentliche Entwicklung eines Baukastensystems beginnen kann, müssen die Ziele der Baukastenentwicklung festgelegt werden. Diese stehen in enger Beziehung zu den Unternehmenszielen bzw. der Unternehmensstrategie und können daher nicht allgemeingültig angegeben werden. Die Festlegung der Ziele hat allerdings einen großen Einfluss auf die Wahl des Baukastencharakters (z. B. Hersteller- oder Anwenderbaukasten) und damit die Aufteilung der Bausteine. Abb. 17.11 zeigt ein Beispiel für eine unterschiedliche Gewichtung von Zielen für unterschiedliche Produkte (Renner 2007). Demnach ist ein Hauptziel bei der Entwicklung eines Baukastens für Pkw-Sitze die Erhöhung der Flexibilität, während die Reduktion der Variantenzahl keine Rolle spielt. Bei der Entwicklung eines Baukastensystems für Pkw-Klimakompressoren ist es jedoch genau

**Tab. 17.9** Begriffe zur Baukastensystematik

Ordnende Gesichtspunkte	Unterscheidende Merkmale
Bausteinarten:	Funktionsbausteine Grundbausteine Hilfsbausteine Sonderbausteine Anpassbausteine Nichtbausteine Fertigungsbausteine
Bausteinbedeutung:	Muss-Bausteine Kann-Bausteine
Bausteinkomplexität:	Großbausteine Kleinbausteine
Baustein kombination:	Nur gleiche Bausteine Nur verschiedene Bausteine Bausteine und Nichtbausteine
Baustein- und Baukastenauflösungsgrad:	Anzahl der Einzelteile je Baustein Anzahl der Bausteine und ihre Kombinationsmöglichkeit

**Abb. 17.11** Stoßrichtungen bei der Baukastenentwicklung (nach Renner 2007)

andersherum. Hier soll die Variantenzahl reduziert werden, während eine Erhöhung der Flexibilität für diese Produktart nicht notwendig erscheint.

Bei der Formulierung von Forderungen und Wünschen müssen vom Produktprogramm zu erfüllende, unterschiedliche Aufgaben sorgfältig und vollständig erarbeitet werden. Aus den verschiedenen Anwendungsszenarien ergeben sich schließlich verschiedene Ausprägungen einer Anforderung. Es kommt zu sog. Anforderungsspreizungen (vgl. Renner 2007; Stechert 2010a; Nehuis et al. 2011), d. h., eine Anforderung muss in verschiedenen Varianten durch unterschiedliche Werte realisiert werden. Hieraus ergeben sich spezifische Anforderungskollektive für die einzelnen Varianten. Dabei können einige Anforderungen über alle Varianten als fest betrachtet, andere auf eine Anzahl geeigneter Stufen festgelegt und wieder andere müssen variabel gehalten werden. Zur gezielten Erfassung und Verarbeitung wurden kürzlich Anforderungsmanagementmethoden eingeführt, die z. B. basierend auf objektorientierten Modellierungssprachen wie der Systems Modeling Language (SysML), die Komplexität abbilden können (Stechert 2010a). Kennzeichnend für die Anforderungsliste eines Baukastensystems ist die Forderung nach mehreren Gesamtfunktionen. Aus diesen ergeben sich dann die vom Baukastensystem zu erfüllenden Gesamtfunktionsvarianten.

Von besonderer Bedeutung für eine wirtschaftliche Auslegung und Abgrenzung von Baukästen sind Angaben über die marktseitig erwartete Häufigkeit der einzelnen Gesamtfunktionen. Bereits Friedewald (1970) spricht von einem Quantifizieren der Funktionsvarianten mit dem Grundgedanken, einen Baukasten technisch und wirtschaftlich für diejenigen Gesamtfunktionsvarianten zu optimieren, die am häufigsten verlangt werden. Verteuert die Realisierung selten benötigter Varianten den Aufbau des Baukastens, so wird man versuchen, diese Varianten aus dem Baukastensystem im Interesse eines wirtschaftlichen Gesamtsystems herauszunehmen. Je genauer diese Untersuchungen vor der eigentlichen Entwicklung durchgeführt werden, umso größer sind die Chancen auf eine wirtschaftliche Verbesserung gegenüber einer Einzelausführung. Die Typbeschränkung mit dem Wegfall wenig gefragter und kostenungünstiger Funktionsvarianten kann jedoch endgültig erst dann vorgenommen werden, wenn das erarbeitete Konzept oder sogar der Entwurf Aufschluss über die Kosten der Gesamtfunktionsvarianten selbst und über den Einfluss jeder einzelnen Variante auf die Kosten des gesamten Baukastens geben.

**Aufstellen von Funktionsstrukturen** Dem Aufstellen von Funktionsstrukturen kommt bei Baukastenentwicklungen eine besondere Bedeutung zu. Mit der Funktionsstruktur, d. h. mit dem Aufgliedern der geforderten Gesamtfunktion in Teilstrukturen, wird die Baustuktur des Systems bereits weitgehend festgelegt. Gleich zu Beginn muss versucht werden, die geforderten Gesamtfunktionsvarianten so in Teilstrukturen aufzugliedern, dass entsprechend den in Abb. 17.10 angegebenen Funktionsarten möglichst wenige, gleiche und wiederkehrende Teilstrukturen (Grund-, Hilfs-, Sonder- und Anpassfunktionen) entstehen. Die Funktionsstrukturen der Gesamtfunktionsvarianten müssen untereinander nach logischen und physikalischen Gesichtspunkten verträglich und die mit ihnen festgelegten Teilstrukturen im Sinne des Baukastens austausch- und kombinierbar sein. Dabei wird es je nach Aufgabenstellung zweckmäßig sein, die Gesamtfunktionen durch

Muss-Funktionen und durch aufgabenspezifisch hinzukommende Kann-Funktionen zu verwirklichen.

Abbildung 17.12 zeigt als Beispiel für das in Beitz und Keusch (1973) ausführlich dargestellte Gleitlager-Baukastensystem die Funktionsstruktur mit den wichtigsten geforderten Bausteinen „Loslager“, „Festlager“ und „Festlager mit hydrostatischer Entlastung“ sowie den dazu erforderlichen Grund-, Sonder-, Hilfs- und Anpassfunktionen. Am Beispiel der Teiffunktion „drehendes gegen ruhendes System abdichten“ sei darauf hingewiesen, dass es oft wirtschaftlich ist, mehrere Funktionen zu einer komplexen Funktion zusammenzufassen: So wurde im vorliegenden Fall die Grundfunktion „Abdichten“ mit einer Anpassfunktion wegen verschiedener Anschlussbedingungen kombiniert. Der diese komplexe Funktion erfüllende Fertigungsbaustein „Wellendichtung“ ist deshalb als Rohteil so ausgeführt, dass er in verschiedenen Bearbeitungsstufen als einfache Schneidendichtung, als Schneidendichtung mit zusätzlichem Labyrinth oder als Dichtung mit zusätzlichem Kupplungsverschalungsträger ausgeführt werden kann (s. Abb. 17.13). Ferner sei darauf hingewiesen, dass es Sonderfunktionen (Sonderbausteine) gibt, die mindestens in einer Gesamtfunktionsvariante vorkommen (hier: „Axialkraft übertragen“), andere, die für alle Gesamtfunktionsvarianten nur Kann-Bausteine darstellen (hier: „Öldruck messen“) sowie solche, die erst ab einer bestimmten Größenstufe einer Grundfunktion notwendig werden (hier: „Drucköl zuführen“).

Zum Aufstellen von Funktionsstrukturen werden folgende Ziele hervorgehoben:

- Anzustreben ist eine Erfüllung der geforderten Gesamtfunktionen nur mit der Kombination möglichst weniger und einfach zu realisierender Grundfunktionen.
- Die Gesamtfunktionen sollten in Grundfunktionen und wenn notwendig in Hilfs-, Sonder- und Anpassfunktionen gemäß Abb. 17.10 so aufgeteilt werden, dass die Varianten mit hohem Bedarf überwiegend mit Grundfunktionen und die seltener geforderten Varianten zusätzlich mit Sonder- und Anpassfunktionen aufgebaut werden. Für sehr selten geforderte Funktionsvarianten sind Mischsysteme mit zusätzlichen Einzelfunktionen (Nichtbausteinen) häufig wirtschaftlicher.
- Die Zusammenfassung mehrerer Teiffunktionen zu einem Baustein ist ebenfalls eine wirtschaftliche Lösung. Sie empfiehlt sich besonders zum Erfüllen von Anpassfunktionen.

**Suchen von Wirkprinzipien und Lösungsvarianten** Es müssen nun Wirkprinzipien zum Erfüllen der Teiffunktionen gefunden werden. Bei der Suche sind vor allem solche Prinzipien zu finden, die bei Beibehaltung des gleichen Wirkprinzips und der grundsätzlich gleichen Gestaltung Varianten ermöglichen. Es ist in der Regel günstig, für die einzelnen Funktionsbausteine gleiche Energiearten und weitgehend physikalisch ähnliche Wirkprinzipien vorzusehen. So ist es z. B. wirtschaftlicher und auch technisch für die Kombination der Teillösungen zu Gesamtlösungen (Lösungsvarianten) zweckmäßiger, verschiedene Antriebsfunktionen mit nur einer Energieart zu erfüllen, als in einem Baukastensystem elektrische, hydraulische und mechanische Antriebe gleichzeitig vorzusehen.

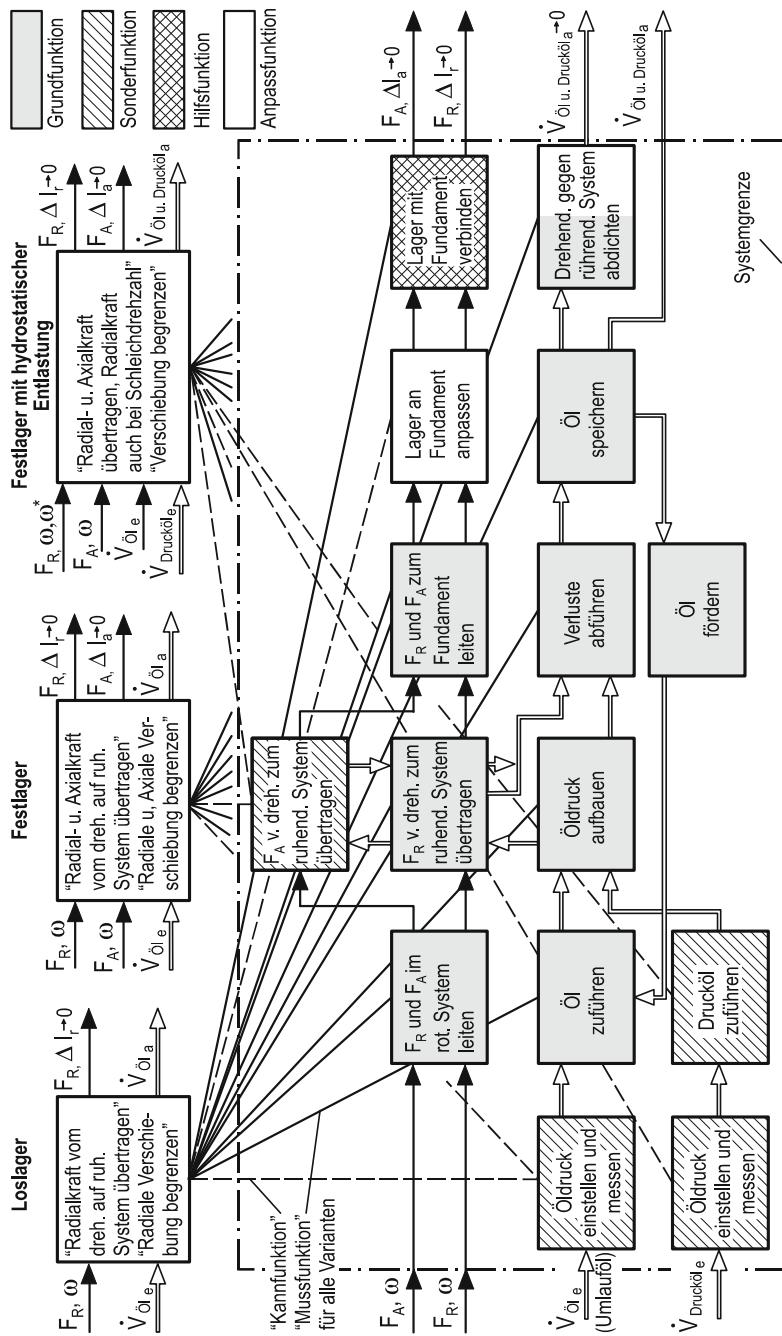
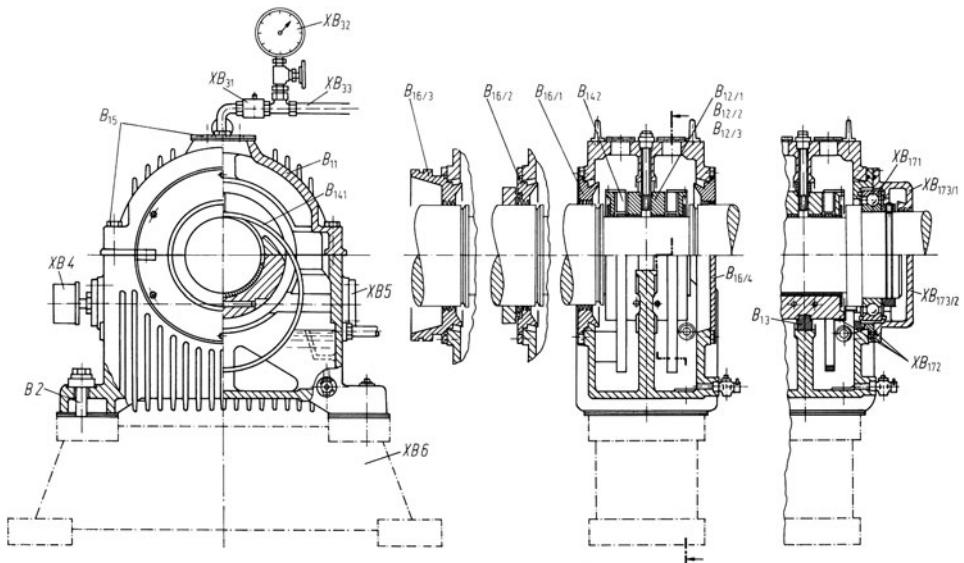


Abb. 17.12 Funktionsstruktur für ein Gleitlager-Baukastensystem



**Abb. 17.13** Entwurf des Gleitlager-Baukastensystems (nach Abb. 17.12) (Werkbild AEG-Telefunken)

Ein weiterer Gesichtspunkt, der zu einer fertigungsgünstigen Lösung führt, ist die Erfüllung mehrerer Funktionen durch nur einen Baustein mit verschiedenen Bearbeitungsstufen. Generelle Regeln können hierfür jedoch wegen der Vielschichtigkeit der technischen und wirtschaftlichen Einflussfaktoren nicht ausgesprochen werden. So erscheint es bei dem konzipierten Gleitlagersystem (Abb. 17.13) technisch und wirtschaftlich günstiger, für kleine Axialkräfte die Lagerschale mit seitlichen Anlaufflächen zur Aufnahme der Axialkräfte zu versehen, anstatt nur aus prinzipiellen Erwägungen Radial- und Axialkräfte über den gesamten Größenbereich durch ausgeprägte Axial-Gleitlager zu übertragen.

**Auswählen und Bewerten** Werden bei dem vorhergehenden Arbeitsschritt mehrere Lösungsvarianten gefunden, so müssen diese nun nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien beurteilt und die günstigste prinzipielle Lösung ausgewählt werden. Eine solche Auswahl ist erfahrungsgemäß bei dem niedrigen Informationsstand über die Varianten schwierig. So werden bei dem Gleitlagersystem einerseits bereits in der Konzeptphase durch Bewerten Vorentscheidungen getroffen, z. B. über den Einsatz eines Gleitlagers oder Wälzlaglers zur Aufnahme von Axialkräften, andererseits kann die endgültige Entscheidung über das günstigste Schmiersystem (Losring, Festring) erst nach dem Bau von Prototypen und entsprechenden Versuchen getroffen werden.

Neben der Ermittlung der technischen Wertigkeiten der einzelnen Konzeptvarianten ist bei Baukastensystemen vor allem die Betrachtung der wirtschaftlichen Gegebenheiten wichtig. Dazu ist es notwendig, den fertigungstechnischen Aufwand der Bausteine und ihren kostenmäßigen Einfluss auf das gesamte Baukastensystem abzuschätzen. In einem

ersten Schritt müssen also die zu erwartenden „Funktionskosten“ der Teifunktionen bzw. der sie erfüllenden Bausteine bestimmt werden. Bei der niedrigen Konkretisierungsstufe der Konzeptphase kann das in der Regel nur eine recht grobe Abschätzung sein. Da Grundbausteine in allen Ausführungsvarianten vorkommen, wird man solche Lösungen vorziehen, die Grundbausteine mit geringem Fertigungsaufwand ermöglichen und damit niedrigere Kosten ergeben. Sonder- und Anpassbausteine stehen bei einer Kostenminimierung erst an zweiter Stelle.

Zur Kostenminimierung eines Baukastensystems müssen nicht die Bausteine allein, sondern auch ihre gegenseitige Beeinflussung betrachtet werden. Besonders muss der Einfluss der Sonder-, Hilfs- und Anpassbausteine auf die Kosten der Grundbausteine analysiert werden. Der Kosteneinfluss jeder Gesamtfunktionsvariante auf die Kosten des gesamten Baukastensystems muss erfasst werden, und zwar für alle betrachteten Baustrukturvarianten. Die Klärung dieses Kosteneinflusses ist häufig nicht einfach. So würde z. B. bei dem betrachteten Gleitlagersystem eine Funktionsvariante „Öl intern rückkühlen“ den Grundbaustein „Lagergehäuse“ mit seinen Grundfunktionen „Kraft  $F_R$  und  $F_A$  zum Fundament leiten“ und „Öl speichern“ durch die Abmessungen des in den Ölsumpf (Ölspeicher) des Lagergehäuses einzuhangenden Sonderbausteins „Wasserkühler“ beträchtlich beeinflussen. Die Kosten aller Gesamtfunktionsvarianten, die den Grundbaustein „Lagergehäuse“ enthalten, würden sich infolge des Sonderbausteins „interner Wasserkühler“ und der damit verbundenen Vergrößerung des Lagergehäuses erhöhen. Liegt für diese Variante ein nur geringer Bedarf vor, so kann es durchaus wirtschaftlicher sein, einen Ölückkühler außerhalb des Lagergehäuses anzutragen und den Mehraufwand der dann notwendigen Ölpumpe in Kauf zu nehmen, als für alle vorkommenden und vor allem umsatzstarken Varianten des Baukastensystems den Grundbaustein „Lagergehäuse“ zu verteuern.

Ist eine marktgerechte Anpassung des Konzepts nicht möglich, so sollte versucht werden, kostenungünstige Funktionsvarianten aus dem Baukastensystem zu streichen. Es wird häufig wirtschaftlicher sein, ausgefallene und das Gesamtsystem verteuende Varianten im Bedarfsfall durch Einzelausführungen zu ersetzen, als diese mit Zwang in das Baukastensystem hineinzubringen. Eine weitere Ausweichmöglichkeit bietet auch der Einsatz von Mischsystemen.

**Erstellen der Gesamtentwürfe** Nachdem das Konzept vorliegt, müssen die einzelnen Bausteine nicht nur funktions- sondern auch fertigungsgerecht gestaltet werden. In einem Baukastensystem hat die Festlegung fertigungs- und montagegerechter Bausteine eine besondere wirtschaftliche Bedeutung. Unter Beachtung von Gestaltungsrichtlinien muss versucht werden, die für den Baukasten erforderlichen Grund-, Sonder-, Hilfs- und Anpassbausteine so zu gestalten, dass die Zahl der gleichen und wiederkehrenden Werkstücke groß ist und diese möglichst mit nur wenigen Rohtenilen und Bearbeitungsgängen verwirklicht werden.

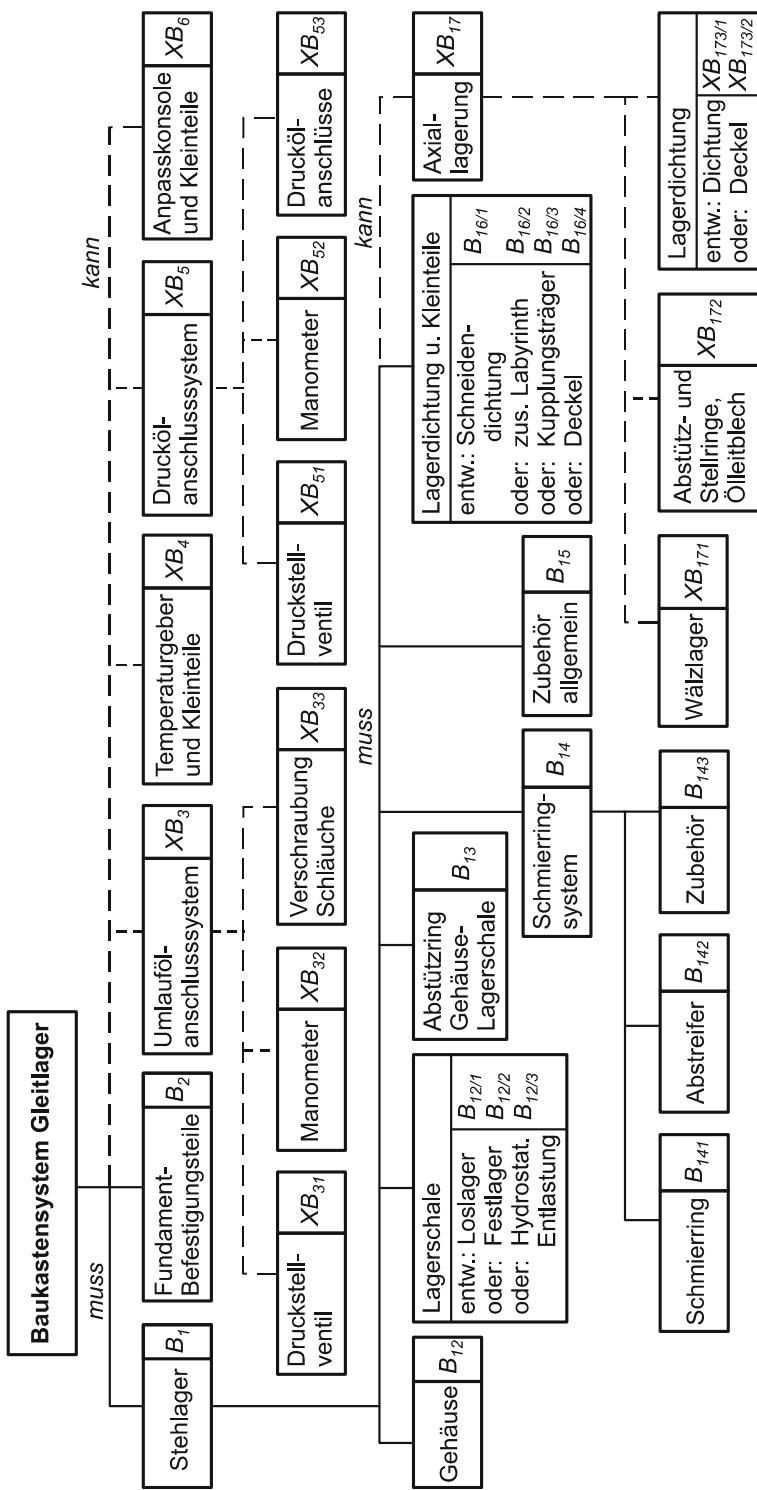
Angesichts einer geforderten Größenstufung ist die richtige Wahl des Auflösungsgrades für die Bausteine wichtig. Hierbei ist eine Differentialbauweise hilfreich. Das Finden des

optimalen Auflösungsgrades ist allerdings problematisch, denn er wird von zahlreichen Kriterien beeinflusst:

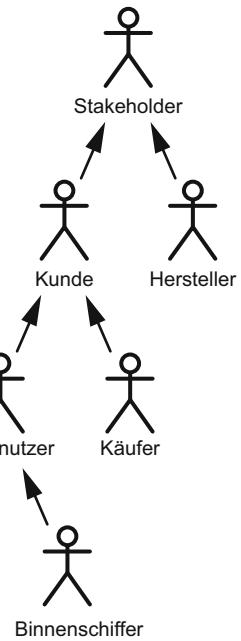
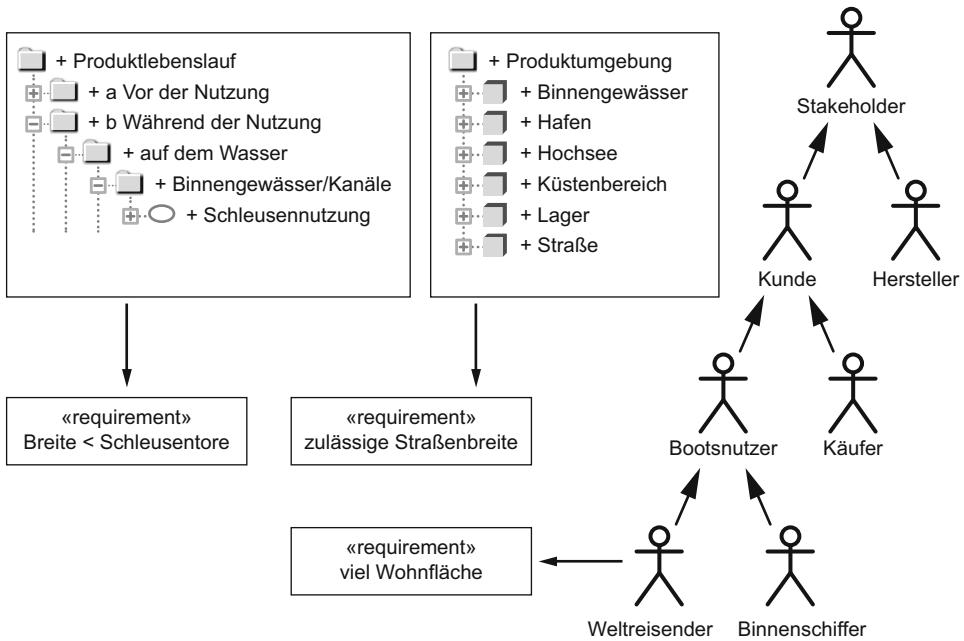
- Anforderungen und ihre Qualitätsmerkmale sind bei Beachtung der Auswirkungen von Fehlerfortpflanzung einzuhalten. So erhöht z. B. die Zahl der Einzelteile die notwendigen Passungen, oder sie wirkt sich infolge der zahlreichen Fügestellen funktionsmäßig ungünstig aus, z. B. im Schwingungsverhalten der Maschine.
- Die Gesamtfunktionsvarianten sollen durch eine einfache Montage der Bausteine (Einzelteile und/oder Baugruppen) entstehen.
- Bausteine sind nur soweit aufzulösen, wie Funktionsfähigkeit und Qualität es erfordern und die Kosten es zulassen.
- Bei Anwenderbaukästen sind insbesondere die häufig verwendeten Bausteine festigkeits- und verschleißmäßig so aufzugliedern und auszulegen, dass eine möglichst gleich hohe Gebrauchsdauer oder eine leichte Austauschbarkeit gegeben sind.
- Beim Festlegen des Auflösungsgrades hinsichtlich Kosten und Fertigungszeiten ist immer der gesamte Baukasten zu betrachten. Von besonderer Bedeutung ist neben den Konstruktionskosten die Erfassung der Auftragsabwicklung im Konstruktions- und Fertigungsbereich, d. h. auch der Arbeitsvorbereitung, des Fertigungsablaufs einschließlich Montage, der Materialwirtschaft und schließlich des Vertriebs, vgl. Franke et al. (2011).

Abbildung 17.13 zeigt den Gesamtentwurf für das schon betrachtete Gleitlagersystem. In Abb. 17.14 ist entsprechend der in Abb. 17.12 dargestellten Funktionsstruktur die Baustruktur mit den wichtigsten Baugruppen und Einzelteilen für die Gesamtfunktionsvarianten zusammengestellt, der tatsächliche fertigungstechnische Auflösungsgrad des Baukastensystems ist größer. Vergleicht man die Funktionsstruktur mit der ausgeführten Baustruktur, so erkennt man, dass bei vorliegendem Baukastensystem mehrere Funktionen durch nur einen Baustein bzw. Varianten dieses Bausteins verwirklicht werden.

**Ausarbeiten von Fertigungsunterlagen und DV-Unterstützung** Die Fertigungsunterlagen müssen so ausgearbeitet werden, dass bei der Auftragsabwicklung eine einfache, DV-unterstützte Zusammenstellung und Weiterverarbeitung der gewünschten Gesamtfunktionsvarianten möglich ist. Für einen entsprechenden Zeichnungsaufbau sind eine zweckmäßige Sachnummerierung und Klassifizierung wichtig, da diese eine Grundlage für die Verkettung der Bausteine (Einzelteile und Baugruppen) untereinander bilden. Die Verbindung der einzelnen Bausteine zur Produktvariante wird in der Stückliste festgehalten. Als Stücklistenaufbau eignet sich hierfür die sog. Varianten-Stückliste (Eversheim und Wiendahl 1971), die auf der Baustruktur des Produkts aufbaut und die Muss- und Kann-Bausteine herausstellt. Besonders geeignet für die Nummerung von Zeichnungen und Stücklisten bei Baukastensystemen ist die Parallelverschlüsselung, die eine Identifizierungsnummer zur eindeutigen und unverwechselbaren Bezeichnung von Bauteilen und Baugruppen sowie eine Klassifikationsnummer zur funktionsorientierten Einordnung und zum Abruf dieser Bauteile und Baugruppen enthält. Die Klassifikationsnummer ist für ein



**Abb. 17.14** Baustruktur (Erzeugnisstammbaum) des Baukastensystems für hydrodynamisch geschmierte Radialgleitlager mit zusätzlichem Axiallager und hydrostatischer Druckölfentlastung (X kennzeichnet Kann-Bausteine)



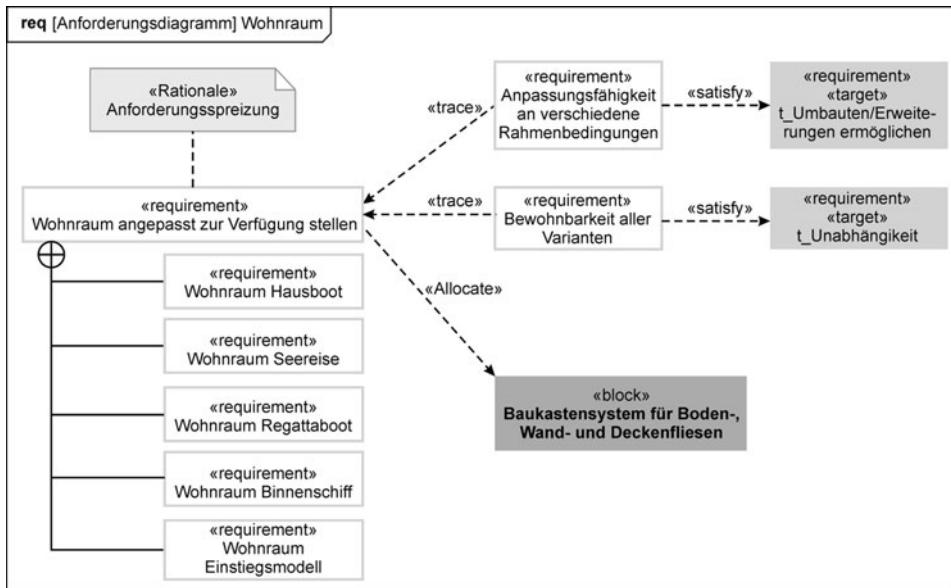
**Abb. 17.15** Darstellung der Anforderungsherkunft aus der Analyse des Produktlebenslaufs und der Produktumgebung

Baukastensystem besonders wichtig, da man mit ihr die Ähnlichkeit oder Gleichheit von Bauteilen hinsichtlich ihrer Funktion oder sonstiger Sachmerkmale erkennen kann.

Komplexe Baukastensysteme mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Varianten lassen sich übersichtlich in Konfiguratoren abbilden. Diese erlauben durch Verwaltung der Varianten der Bausteine, eine Regelverarbeitung und gezielte Führung des Nutzers durch die Auswahlmöglichkeiten eine übersichtliche Konfiguration der Produkte (Franke et al. 2011).

### 17.1.2.3 Beispiel

Am Beispiel der Entwicklung eines *Katamaranbaukastens* wird gezeigt, wie durch richtige Wahl der Parameter in einem Baukastensystem sowie einer Konstruktionsstrategie mit abgestimmtem Einsatz von CAx-Werkzeugen hohe Flexibilität erreicht werden kann. Dazu werden zunächst die Zielrichtungen der Entwicklung festgelegt, die hier im Wesentlichen in einer Erhöhung der Flexibilität für Hersteller und Kunden bei einer gleichzeitigen Reduktion der Kosten lagen. So sollte, z. B. ein Einsteigermodell mit Basisfunktionen realisiert werden, welches durch weitere Bausteine nachträglich durch zusätzliche Funktionen erweitert werden kann. Weitere wichtige Randbedingung war die Transportfähigkeit des Bootes durch Privatpersonen, z. B. auf einem Pkw-Anhänger. Anschließend wurden durch eine umfassende Analyse der Produktumgebung die Anforderungskollektive für die Boote erfasst. In Abb. 17.15 ist gezeigt, wie mit Hilfe eines SysML-Modells die Produk-



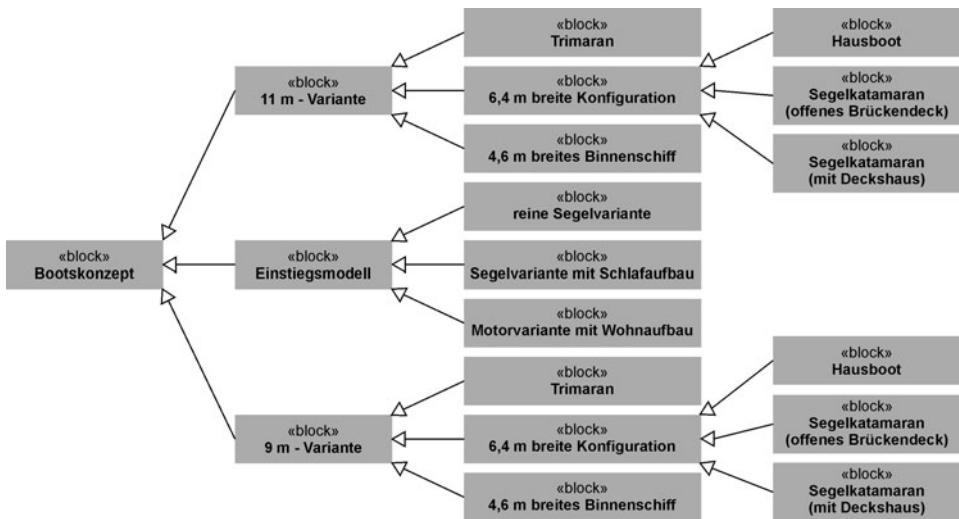
**Abb. 17.16** Darstellung der Anforderungsspreizung für den Wohnraum und seine Beziehung zur Zielsetzung sowie Unterbaukästen

tumgebung systematisch analysiert wurde und wie sich aus Umgebungselementen (z. B. Anwendungsfälle, Stakeholder und Nachbarsysteme über den gesamten Produktlebenslauf) Anforderungen ergeben.

Aus der Analyse der Anforderungskollektive und ausgehend von den Zielsetzungen ergeben sich Anforderungsspreizungen, z. B. für den Wohnraum. Dieser muss für Boote für den Binnenbereich oder Hochseebereich bzw. für Tagesausflüge und Hausbootanwendung deutlich unterschiedlich gestaltet sein. Auf Basis der Anforderungsspreizungen ergeben sich die Startpunkte zur Entwicklung der Baukastenelemente bzw. der Entwicklung von Unterbaukästen, s. Abb. 17.16.

Durch Festlegen der Funktionsumfänge entsteht die in Abb. 17.17 dargestellte Produktfamilie. Es lassen sich zunächst ein kurzes Einstiegsmodell, ein mittleres und ein langes Boot mit jeweils unterschiedlichen Rümpfen unterscheiden. Für die beiden größeren Liniен gibt es breite Varianten für offene Gewässer und schmale für Binnengewässer. Darüber hinaus gibt es jeweils Segel- und Motorvarianten mit unterschiedlich großem Wohnaufbau. Die Varianten sind vom Kunden auch nachträglich neu konfigurierbar. Beispielsweise kann das Einstiegsmodell durch Kauf eines längeren Rumpfes zu einem Trimaran rekonfiguriert werden.

Aus der Zielsetzung der Flexibilität und unter der Randbedingung der Kostenreduktion soll die Anzahl der Bausteine gering gehalten sowie die Wieder- und Weiterverwendung von Bausteinen zur Rekonfiguration der Varianten genutzt werden. Als Grundbausteine ergeben sich so die Rümpfe in den drei genannten Bausteinvarianten und das Brückendeck. Als Hilfsbausteine werden diverse Anschlusselemente benötigt, um Rümpfe und Brückendeck



**Abb. 17.17** Darstellung der Produktfamilie des Katamarans

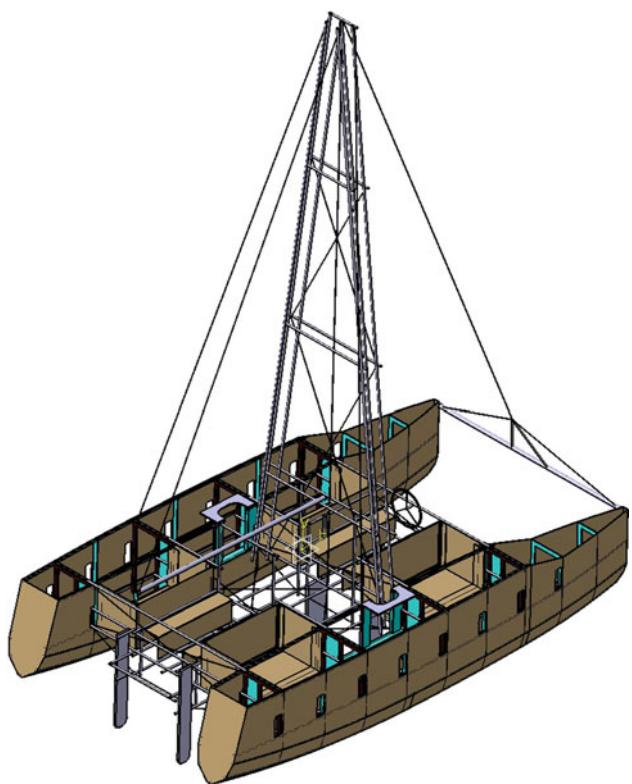
zu montieren. Zusätzlich zu diesen Muss-Bausteinen werden durch Kann-Bausteine Sonderfunktionen erfüllt. Beispielsweise kann ein Mast zum Segeln oder ein Motor montiert werden. Es kann ein Deckshaus oder ein Hausbootaufbau aufgesetzt werden.

Die so festgelegten Bausteine werden im CAD-System auskonstruiert. Durch die frühzeitige systematische Festlegung der Bausteine und Schnittstellen zwischen den Bausteinen im SysML-Modell konnten die Bauteile und Baugruppen im CAD konsistent und ohne viel Iteration über alle Varianten modelliert werden. Abbildung 17.18 zeigt den unteren Teil einer der entstandenen Varianten. Zu erkennen sind die beiden neun Meter langen Rümpfe, die durch eine Brückenkonstruktion miteinander verbunden sind. Dieser Katamaran ist durch den Mastaufbau deutlich als Segelvariante erkennbar. Im Unterdeck sind pro Rumpf jeweils zwei Schlafkabinen für die Crewmitglieder vorgesehen.

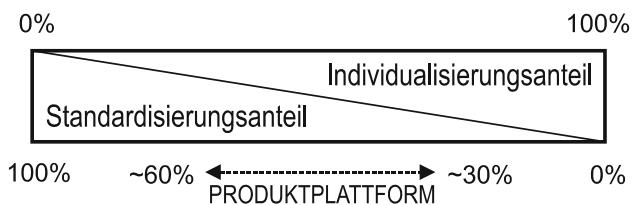
### 17.1.3 Plattformbauweise

Die Plattformbauweise ist besonders durch seine Anwendung in der Automobilindustrie bekannt geworden (Piller und Waringer 1999). Als Plattformstrategie wird eine Vorgehensweise zur Entwicklung variantenreicher Produkte mit kurzen Zykluszeiten bezeichnet, bei der durch eine gezielte Planung Rationalisierungspotenziale aufgrund gleicher Teile und Strukturen genutzt werden (Haf 2001; Cornet 2002). Ein Plattformprodukt besteht aus einer ausführungsneutralen Produktplattform mit standardisierten Elementen. Diese bilden eine einheitliche Basis für alle Varianten des Produktprogramms. Zur Variantenerzeugung werden der Plattform individualisierte Elemente („Produktgestaltungselemente“) aufgesetzt. Der Anteil standardisierter Elemente liegt dabei typischerweise zwischen 30 % und 60 %, gemessen am Wert des Endprodukts, s. Abb. 17.19 (Kraus 2005). Dass die Produkt-

**Abb. 17.18** CAD-Modell des unteren Teils eines 9-Meter-Katamarans mit Segelmast und Schlafkabinen im Unterdeck



**Abb. 17.19** Standardisierungs- und Individualisierungsanteil einer Produktplattform (Kraus 2005)



verwandtschaft der gemeinsamen Produktplattform unter der nach außen wahrnehmbaren Produktoberfläche nicht erkennbar ist, stellt ein weiteres Kennzeichen der Plattformbauweise dar (Stang et al. 2002). Plattform- und Baukastenbauweise können aufgrund der beschriebenen Merkmale nicht als identische Bauweisen bezeichnet werden, denn die Produktvarianten werden bei der Plattformbauweise nicht grundsätzlich durch Konfiguration von mehreren vorausgedachten Bausteinen zusammengesetzt.

Die Produktplattform wird häufig unter funktionalen Gesichtspunkten festgelegt und bildet den größten gemeinsamen Nenner einer Produktfamilie. Dabei wird meist die Kernkompetenz des Unternehmens in die Plattform übernommen. Beispielsweise kann die Wägezelle als zentrales Plattformelement einer Laborwaage verwendet werden

(Müller 2000). Die Differenzierung erfolgt z. B. über den Gewichtsbereich, Auflösung und Abschirmung der Wägekammer.

Fahrzeugplattformen bestehen z. B. aus Teilen der Bodengruppe, Antriebsstrang, Achsen und Lenkstange (Braess und Seiffert 2011). Die Differenzierung erfolgt im Wesentlichen durch für den Kunden sichtbare Elemente, z. B. Beplankung (Exterieur) und Verkleidung (Interieur). Die Plattform bildet die oberste Ebene der Fahrzeugplattformstruktur. Aus ihr werden zunächst Fahrzeugtypen abgeleitet, die schließlich zu Fahrzeugvarianten entwickelt werden. Beispielsweise konnten im Volkswagenkonzern die Fahrzeugtypen Audi A3, Audi TT, VW Caddy, VW Golf, VW Golf Plus, VW Jetta, VW Tiguan, VW Touran, Seat Altea, Seat Leon, Seat Toledo und Škoda Octavia mit allen ihren Varianten aus einer Plattform abgeleitet werden.

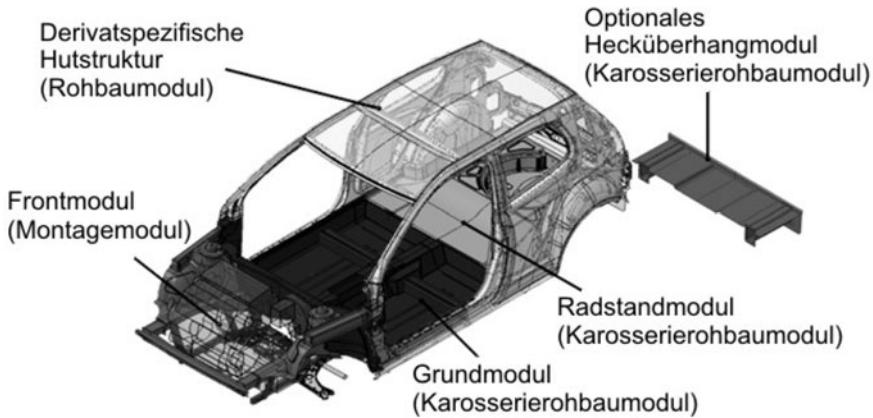
Zusätzlich zur reinen Plattformstrategie wird eine plattformübergreifende Verwendung von Gleichteilen angestrebt, z. B. Motorvarianten oder Aggregate, die in unterschiedlichen Plattformen eingesetzt werden. Hierzu werden der Plattformstrategie außerdem Baukasten- und Baureihenansätze überlagert, um z. B. unterschiedliche Größen oder Leistungsklassen abbilden zu können.

Plattformstrategien versuchen demnach, durch geschickte Kombination von Standardisierung und Individualisierung die positiven Effekte beider Ansätze auszunutzen. Durch Standardisierung kann eine schnellere und risikoärmere Produktentwicklung realisiert, die Markteintrittsbarrieren reduziert und durch Qualitätssteigerung die Kundenbindung verbessert werden. Außerdem kann durch Skaleneffekte eine Kostensenkung erzielt werden. Die gezielte Individualisierung erlaubt es, durch kundenrelevante Differenzierung große Marktsegmente zu bedienen und neue Kunden zu gewinnen.

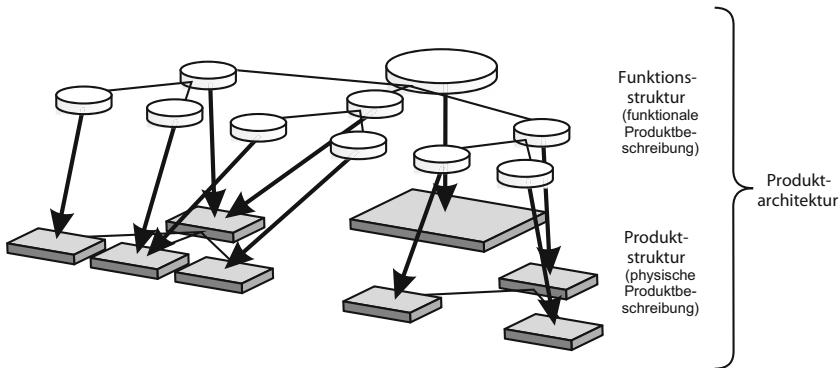
Die Entwicklung von Produktplattformen erfolgt somit als ein strategisches Projekt und ist in vielen Fällen technologiegetrieben. Das bedeutet, die Entwicklung und Beherrschung einer neuen Technologie (z. B. neue Technologien zur Erfüllung der Kernfunktionen der Produkte, neue Fertigungstechnologien für die Produktion der Produkte) mündet in die Entwicklung und Freigabe einer neuen Produktplattform. Diese Plattform gilt dann über einen längeren Zeitraum als stabile Basis zur Ableitung der Produkte. Vereinzelt können neue Technologien bereits über der Laufzeit der Plattform durch kleinere Anpassungen in diese integriert werden. Große Technologiesprünge erfordern hingegen die Neuentwicklung der Plattform.

Abbildung 17.20 zeigt Ergebnisse des Projekts „Faszination Karosseriebau“ (Krusche et al. 2004). Die Fahrzeugkarosserie wird bei diesem Konzept in Schalenbauweise gefertigt. Die Aufteilung in standardisierte Module folgte im Wesentlichen funktionalen Gesichtspunkten, wobei das Grundmodul die Basisfunktionalität der Karosserie bereitstellt.

Durch zusätzliche Module werden der Radstand sowie der hintere Überhang eingestellt. Das Front-End kann für eine High-End-Variante aus Leichtbauwerkstoffen gefertigt werden, um z. B. eine optimierte Gewichtsverteilung zu ermöglichen. Damit ist der Karosserierohbau einer Fahrzeugfamilie festgelegt und bildet einen Teil der Plattform ab (bezogen auf die Karosserie). Durch den Hut wird die wahrnehmbare Form festgelegt, d. h., durch Styling und Abstimmung innerhalb des Fahrgastrums werden die wesentli-



**Abb. 17.20** Aufteilung der Fahrzeugkarosserie in Schalenbauweise nach funktionalen Gesichtspunkten im Projekt Faszination Karosseriebau an der TU Braunschweig



**Abb. 17.21** Produktarchitektur als Beschreibung der Beziehungen zwischen der Funktions- und der Produktstruktur (nach Göpfert 1998)

chen vom Kunden wahrnehmbaren Fahrzeugeigenschaften beeinflusst und das Image des Fahrzeugs transportiert.

#### 17.1.4 Modularisierung und Produktarchitektur

Nach der VDI-Richtlinie 2221 wird nach dem Erkennen der prinzipiellen Lösung das Gliedern in Module gefordert. Die Produktarchitektur ist das Beziehungsschema zwischen der Funktionsstruktur eines Produkts und seiner physikalischen Struktur, also der Bau- bzw. Produktstruktur (Ulrich 1995). Die Erstellung der Produktarchitektur ist demnach eine wesentliche Aufgabe der Produktentwicklung und kann als Transformation der funktionalen in eine physikalische Produktbeschreibung betrachtet werden (Göpfert 1998). Die Eigenschaften der Beziehungen zwischen beiden Größen kennzeichnen den Charakter der Produktarchitektur, s. Abb. 17.21.

**Abb. 17.22** Produktarchitekturtypen (Göpfert und Steinbrecher 2000)

		hoch	modulare Produktarchitektur
		gering	physisch entkoppelte Produktarchitektur
hoch		funktional entkoppelte Produktarchitektur	
funktionale Unabhängigkeit	hoch		
gering	gering	integrale Produktarchitektur	physisch entkoppelte Produktarchitektur
		gering	hoch
		physische Unabhängigkeit	

Die Produktarchitektur kann nun genutzt werden, um die Modularität eines Produkts zu beschreiben, s. Abb. 17.22. Die Modularität einer Produktarchitektur kann anhand der funktionalen und physikalischen Unabhängigkeit ihrer Komponenten klassifiziert werden. Funktional unabhängig ist eine Komponente dann, wenn sie genau eine Teilfunktion erfüllt. Es besteht also eine eindeutige Beziehung zwischen Funktion und Komponente. Vor dem Hintergrund des Ziels einer Produktmodularisierung ist eine Komponente physikalisch unabhängig, wenn sie vor dem Zusammenbau des Produkts eine zusammenhängende Einheit bildet, also beispielsweise unabhängig vom restlichen Produkt geprüft werden kann. Im Falle einer funktionalen bei einer gleichzeitig physischen Unabhängigkeit ergibt sich eine modulare Produktarchitektur. Sind die Elemente funktional und physisch gekoppelt, spricht man von einer integralen Produktarchitektur. Das Ziel der Produktmodularisierung ist nicht die Maximierung der Modularität, das würde eine unnötige Zunahme von Schnittstellen bedeuten, sondern deren Optimierung für unterschiedliche Zielsetzungen.

Auf Basis der Produktarchitektur und der bisherigen Darstellungen können die Begriffe zur Modularisierung eines Produkts wie folgt definiert werden:

*Modularität* ist eine graduelle Eigenschaft der Produktarchitektur im Sinne einer zweckmäßigen Strukturierung.

*Modularisierung* ist die Produktstrukturierung, bei der die Modularität eines Produkts erhöht wird. Ihr Ziel ist die Optimierung einer bestehenden Produktarchitektur, um Produktanforderungen zu erfüllen (Baumgart 2004) oder um Rationalisierungseffekte in der Produktentstehungsphase zu erzielen.

*Modul* ist eine funktional und physisch beschreibbare Einheit, die von den restlichen Produktmodulen weitgehend unabhängig ist (Baumgart 2004).

**Identifikation von Modultreibern** Zur Optimierung der Modulaufteilung müssen zunächst die unterschiedlichen Modultreiber, d. h. „treibende Kräfte“ für die Bildung von Modulen, identifiziert werden. Dabei sind die wirksamen Modultreiber unternehmens- und produktsspezifisch zu berücksichtigen.

Zur Einteilung der Modultreiber existieren verschiedene Möglichkeiten. Stake (2000) ordnet mit einer Sichtweise auf das Produktprogramm Modultreiber in einem Spannungsfeld zwischen Gegenwart und Zukunft bzw. Individualisierung und Standardisierung ein

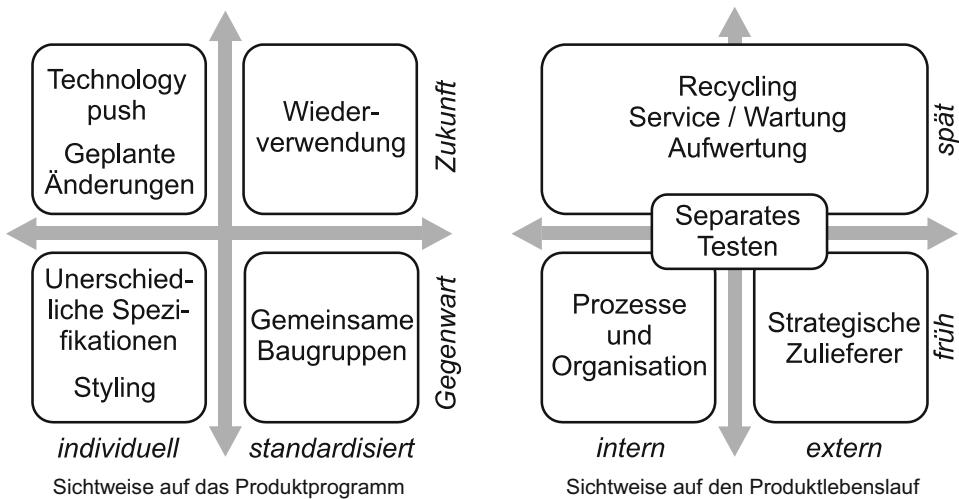


Abb. 17.23 Einteilung von Modultreibern (nach Stake 2000)

(s. Abb. 17.23). Demnach können in der Gegenwart durch Standardisierung gemeinsame Baugruppen in einem Produktprogramm realisiert werden, während einzelne individualisierte Module unterschiedliche Spezifikationen oder ein neues Styling abdecken. Beispielsweise werden Scheinwerfer und Kühlergrill eines Pkw als Module realisiert, um mit vergleichsweise wenigen Änderungen eine sog. Produktaufwertung („Facelift“) durchzuführen und die Verkaufszahlen im letzten Drittel des Produktlebenszyklus noch einmal zu steigern. Für zukünftige Produkte können standardisierte Baugruppen wiederverwendet werden, wodurch sich Entwicklungszeit und -kosten reduzieren lassen und die Qualität sicherstellen lässt. Bereiche, in denen ein „technology push“ oder hinsichtlich der Unternehmensstrategie geplante Änderungen (z. B. Anschaffung neuer Maschinen) erwartet werden, sollten durch individualisierte Module an die neuen Erfordernisse angepasst werden können.

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung ergibt sich laut Stake aus der Sicht auf den Produktlebenslauf, d. h. die Berücksichtigung einer Modulbildung früh bzw. spät im Produktleben. In den frühen Phasen können demnach die unternehmensinternen Prozesse und Organisationen eine Modulbildung notwendig machen. Beispielsweise kann eine bestimmte Entwicklungsaufgabe auf Grund von festgelegten Kapazitäten auf zwei Abteilungen aufgeteilt werden. Um hier die Schnittstellen möglichst übersichtlich zu halten und deren Anzahl zu begrenzen, entwickelt jede Abteilung ein Modul. Diese werden dann später zum Gesamtprodukt zusammengefügt. Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, bestimmte Entwicklungsaufgaben an externe Zulieferer abzugeben. Hier sollen, genauso wie bei interner Arbeitsteilung, die Schnittstellen möglichst klar definiert sein und eine möglichst geringe Anzahl haben.

Bei der Inbetriebnahme ist der Wunsch nach separatem Testen von Bauteilen/Baugruppen der wesentliche Modultreiber. Während der Nutzungsphase sind insbe-

sondere Wartung und Service von Bedeutung, aber auch die nachträgliche Aufwertung, z. B. durch den Austausch von einfachen Modulen durch höherwertige, spielt eine Rolle. Bei immer mehr Produkten ist außerdem das Ende der Nutzungsphase ein wichtiger Aspekt. Hier können Demontagekonzepte, Wieder- und Weiterverwendung von Teilen und der Wunsch nach sortenreiner Werkstofftrennung wichtige Modultreiber sein. Die wichtigsten Modultreiber sind in Tab. 17.10 zusammengefasst dargestellt (in Anlehnung an Ericsson und Erixon 1999; Blees et al. 2008 und durch eigene Überlegungen ergänzt).

**Gestalten von Schnittstellen** Ein wesentlicher Aspekt bei der Modularisierung ist die Betrachtung von Schnittstellen. Es lassen sich organisatorische und technische, d. h. physikalisch vorliegende, Schnittstellen unterscheiden. Beide Arten müssen klar definiert und eindeutig beschrieben sein. Wenn möglich, sollen Standards genutzt oder definiert werden. In jedem Fall müssen Schnittstellendefinitionen geeignet bekannt gemacht werden, so dass eine richtige Nutzung der Schnittstellen sichergestellt ist. Technische Schnittstellen sollen möglichst wenig überdimensioniert werden.

Nach Breidert (2006) lassen sich technische Schnittstellen in eine logische und eine physikalische Ebene unterteilen (s. Abb. 17.24). Dabei erfordert das Leiten von Information (logische Ebene) über eine Schnittstelle auf physikalischer Ebene das Leiten eines Signals. Um ein Signal zu leiten, ist es wiederum erforderlich, einen Stoff bzw. eine Energie zu leiten. Damit ergeben sich als allgemeine Schnittstellenfunktionen das Leiten von Energie, Stoff oder eines Signals.

Die Gestaltung der Schnittstellen kann schließlich durch das Produkt selbst (interne Faktoren) oder durch Prozesse und organisatorische Randbedingungen (externe Faktoren) beeinflusst werden (Breidert 2006). Produktbezogene Einflüsse ergeben sich im Wesentlichen aus der Geometrie der Modulaufteilung und der Konfiguration von Varianten. Dabei sind Schnittstellenrelationen häufig keine 1:1-Zuordnungen, sondern vielmehr n:1- oder n:m-Zuordnungen. Außerdem muss die gewünschte Funktion und die Kompatibilität mit existierenden und zukünftigen Schnittstellen sichergestellt werden. Wesentliche externe Faktoren ergeben sich aus der Verfügbarkeit von personellen (Kapazität, Know-how) und maschinellen (Kapazität, Maschineneigenschaften, bevorzugte Technologien) Ressourcen sowie zugelieferter Komponenten (Lieferbarkeit).

Kroker (2005) schlägt ein Vorgehen zur Systematisierung von Schnittstellen für modulare Karosserien im Automobilbau vor. Für die Festlegung der mechanischen Schnittstellen muss dazu zunächst die sinnvolle Lage der Schnittstellen hinsichtlich Modulaufteilung und Gesamtfahrzeugaspekten (z. B. Lastpfade, People-Package) betrachtet werden. Anschließend werden zur Gestaltung der Schnittstelle harte (nicht zu beeinflussende) und weiche (beeinflussbare) Abhängigkeiten zugrunde gelegt. Beispielsweise ist die Auswahl der Fügetechnik abhängig von den Anforderungen an die Fügetechnik sowie die im Unternehmenskontext zur Verfügung stehende Fügetechnik und somit beeinflussbar. Hingegen resultiert die Dimensionierung der Fügestelle aus nicht beeinflussbaren, von außen vorgegebenen Belastungen. Das Zusammenwirken von ausgewählter Fügetechnik und Dimensionierung führt schließlich zur Gestaltung der Schnittstelle (Prüß et al. 2010).

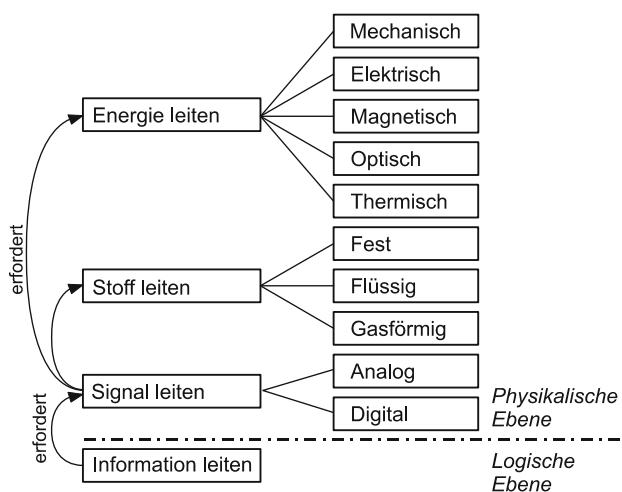
**Tab. 17.10** Zusammenstellung von Modultreibern

Produktentwicklung	
Wiederverwendung	Ein Teil oder eine Unterbaugruppe, das bzw. die höchstwahrscheinlich in der Zukunft nicht angepasst werden wird und bei dem/der sich auch die Technologie und Prozesse der Herstellung nicht bzw. nicht wesentlich verändern werden, können z. B. von einer früheren Produktgeneration übernommen werden. Für solche Teile und Unterbaugruppen ist z. B. eine Investition in teure Produktionsanlagen zu rechtfertigen
Technologische Weiterentwicklung	Teile, die sehr wahrscheinlich in der näheren Zukunft verändert werden müssen. Gründe hierfür können eine Weiterentwicklung der Technologie in Bezug auf das Produkt selbst, d. h. eine Veränderung der Kundenwünsche, und eine Weiterentwicklung der Herstelltechnologien sein. Hier muss ein besonderes Augenmerk auf die Gestaltung der Schnittstellen gelegt werden, damit die betreffenden Module in der Zukunft durch neue, der neuen Technologie angepasste Module ersetzt werden können, ohne dabei große Änderungen in den angrenzenden Modulen nach sich zu ziehen
Geplante Produktänderungen	Teile des Produkts, die auf Grund der Unternehmensstrategie in Zukunft verändert werden sollen. Gründe hierfür entstehen aus neuen Produktgenerationen, die sich in bestimmten Merkmalen vom Vorgänger unterscheiden sollen, einer geplanten Verbesserung der Erfüllung von Kundenanforderungen oder einer Reduzierung der Kosten durch die Einführung spezieller Werkzeuge und Maschinen (z. B. ab einer kritischen Anzahl von Bestellungen)
Entwicklungsprozess und -organisation	Die Arbeitsinhalte bei der Entwicklung der Komponente können durch eine Arbeitsgruppe innerhalb der Unternehmensorganisation abgedeckt werden. Dies kann sowohl rein fachliche Gründe haben als auch auf Grund von verfügbaren Ressourcen festgelegt sein
Unterschiedliche Spezifikationen	Zur Handhabung der geforderten Produktvarianz bzw. Anpassung des Produkts an unterschiedliche Kundenwünsche, sollte die Anzahl der varianzerzeugenden Bauteile so gering wie möglich sein. Außerdem sollte die Erzeugung der Varianten so spät wie möglich im Herstellprozess erfolgen. Unterschiedliche Spezifikationen (Anforderungsspreizungen) können ebenfalls schon in einem parametrischen CAD-Modell berücksichtigt werden
Styling	Das Styling betreffende Module befinden sich im Allgemeinen im sichtbaren Bereich des Produkts. Diese können angepasst werden, um das äußere Erscheinungsbild des Produkts zu verändern und somit aktuellen Trends im Kundengeschmack zu folgen oder eine bestimmte Markenstrategie zu verfolgen

**Tab. 17.10** (Fortsetzung)

<i>Produktion</i>	
Gleichteile	Gleichteile sind Bauteile, die über einen weiten Bereich des Produktspektrums eingesetzt werden können. Dadurch erhöht sich das Herstellvolumen des Moduls und Skaleneffekte werden nutzbar
Herstellprozess und -organisation	Teile, die denselben Herstellprozess benötigen, werden zusammengefasst. Sie können dann über die gleichen Anlagen laufen und die Herstellung kann ggf. automatisiert werden
Montageprozess und -organisation	Teile, die bei der Montage besondere Fähigkeiten der Monteure, besondere Werkzeuge oder Prozesse benötigen oder Besonderheiten bei der Handhabung aufweisen. Sie können dann über die gleichen Montagesträßen laufen und die Montage kann ggf. automatisiert werden
Bearbeitungszeit	Das Teil benötigt eine besonders lange Bearbeitungszeit verglichen mit den übrigen Teilen des Produkts, z. B. hinsichtlich der Herstellung oder der Montage der Einzelteile. Es ist sinnvoll, die Einzelteile in ein Modul zu integrieren und hierfür frühzeitig mit der Bearbeitung zu beginnen, so dass in der Endmontage z. B. nur eine Patrone montiert werden muss
<i>Qualitätssicherung</i>	
Separates Testen	Die Möglichkeit, jedes Modul bereits vor der Endmontage für sich zu testen, kann eine Qualitätsverbesserung des Produkts und eine Verkürzung der Herstellzeiten ermöglichen. Rückmeldungen über fehlerhafte Komponenten erfolgen früher und Fehler können rechtzeitig behoben werden. Der finale Test wird auf einen reinen Integrationstest reduziert
<i>Einkauf</i>	
Verfügbarkeit von Zulieferteilen	Standardkomponenten sollten von externen Zulieferern zugekauft werden, falls die Wertschöpfung innerhalb der Komponente gering und die externe Verfügbarkeit (ggf. durch verschiedene Zulieferer) sichergestellt ist. Außerdem können dadurch Qualitätssicherungsmaßnahmen und Haftungsverantwortung ebenfalls an die Zulieferer abgegeben werden
Lagerhaltung	Die Lagerhaltung der Komponente muss besondere Anforderungen erfüllen
<i>Kundendienst</i>	
Service und Wartung	Teile, die für Service und/ oder Wartung zugänglich sein müssen, sollten möglichst zusammengelegt werden, so dass ein Service- bzw. Wartungsmodul entsteht. Dieses sollte schnell und einfach ausbaubar sein, so dass es schnell repariert bzw. als Ganzes ausgetauscht werden kann. Die Wartungsdauer kann dadurch reduziert und die ergonomischen Bedingungen der Wartungsarbeiten verbessert werden
Ausbau und Erweiterung	Erweiterungsmodule sollen dem Kunden die Möglichkeit geben, das Produkt in der Zukunft neuen Randbedingungen anzupassen bzw. die Funktionalitäten zu erweitern
Recycling	Die Anzahl unterschiedlicher Werkstoffe je Modul sollte möglichst gering sein. Einfach zu verwertende Materialien sollten in eigenen Modulen realisiert werden

**Abb. 17.24** Einteilung von technischen Schnittstellen (nach Breidert 2006)



#### **17.1.4.1 Vorgehen zum Modularisieren**

Häufig findet eine Modularisierung im Zusammenhang mit einer Baukastenentwicklung statt. In solchen Fällen muss das Vorgehen zur Baukastenentwicklung mit dem Vorgehen zur Modularisierung kombiniert angewendet werden. Zur Modularisierung eines Produktes lässt sich folgendes Vorgehen angeben:

Dem *Klären der Aufgabenstellung* kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Bei der Modularisierung steht nicht nur die Abbildung verschiedener Funktionsvarianten im Vordergrund, sondern die Aufteilung der Produktarchitektur hinsichtlich der Modultreiber. Je nach Zielrichtung der Entwicklung können bestimmte Modultreiber höher priorisiert werden, so dass verschiedene Sichtweisen unterschiedliche Modulaufteilungen hervorbringen. Zur Definition und Illustration der Zielrichtung eignet sich z. B. das weiter oben dargestellte Vorgehen nach Renner (2007). Anschließend müssen die relevanten Modultreiber, z. B. anhand der Zusammenstellung (s. Tab. 17.10), identifiziert werden. Aus der Kenntnis der Modultreiber ergeben sich Anforderungen und Restriktionen, z. B. Varianz der Funktionen auf Grund von Kundenwünschen oder fertigungsbedingte Größenrestriktionen von Bauteilen. Anforderungen und Anforderungsspreizungen lassen sich z. B. durch die in Stechert und Franke (2009) dargestellte Modellierungsweise abbilden und auswerten. Unterschiedliche Ausprägungen von Anforderungen lassen sich ggf. auf bestimmte Werte zusammenfassen („Stufensprünge“) und in sinnvollen Anforderungskollektiven zusammenstellen.

Handelt es sich bei der Entwicklungsaufgabe um eine Neuentwicklung, so folgt das *Aufstellen von Funktionsstrukturen* bzw. es folgt das *Analysieren der Produktstruktur* bei der Weiterentwicklung bestehender Produkte, z. B. falls ein gewachsenes Produktsortiment nachträglich in möglichst gleiche Module aufgeteilt werden soll. Die Funktionen lassen sich durch sog. Funktionsträger in technischen Lösungen realisieren. Zwar würde eine 1:1-Zuordnung hier die gegenseitige Beeinflussung minimieren und damit eine große

Unabhängigkeit der Funktionen und Funktionsträger ermöglichen. Reale Konstruktionen zeichnen sich jedoch häufig durch n:m-Zuordnungen aus.

Der nächste Schritt besteht im *Aufteilen in Module*. Die Funktionsträger müssen in geeigneter Weise in Module gegliedert werden. Ericsson und Erixon (1999) schlagen die Anwendung einer sog. „Module Indication Matrix“ (MIM) vor. Hier werden den identifizierten Modultreibern in der Kopfspalte die Funktionsträger in der Kopfzeile gegenübergestellt. In den Zellen wird eine Bewertung der Wirkung der Modultreiber auf den jeweiligen Funktionsträger vorgenommen. Funktionsträger, die durch mehrere Modultreiber stark beeinflusst werden, sollten demnach möglichst als eigenes Modul realisiert werden („Funktionstrennung“). Funktionsträger, die wenig beeinflusst werden, sollten sinnvoll in zuvor festgelegte Module integriert werden („Funktionsintegration“). Besonderes Augenmerk ist dabei der Beachtung von Schnittstellen zu schenken. Aus der Funktionsstruktur können die Flüsse zwischen den Funktionen abgelesen werden. Diese geben Hinweise auf die Gestaltung von Schnittstellen. Die Aufteilung der Module kann dazu der Funktionsstruktur überlagert werden und gibt so bereits frühzeitig einen visuellen Eindruck der Modulaufteilung und der zu berücksichtigenden Schnittstellen wider. Eine weitere Möglichkeit ist die Darstellung in Form einer Schnittstellenmatrix. Eine optimale Modulaufteilung kann in verschiedenen Lebenslaufphasen unterschiedlich ausfallen. Beispielsweise können separate Fertigungsmodule für die Endmontage als vormontiertes Modul eingesetzt oder physikalisch unabhängige Bauteile logisch für den Vertrieb in Module zusammengefasst werden („Winterpaket“). Dabei müssen sich die verschiedenen Modulaufteilungen nicht ausschließen, sondern können in verschiedenen Lebenslaufphasen gezielt verschieden aufgeteilt werden. Ein Ansatz zur übersichtlichen Darstellung der unterschiedlichen Zusammenfassung der Funktionsträger in Module zeigt z. B. Blees et al. (2008).

Da die Aufteilung in Module stark von der jeweiligen Sichtweise abhängt, ist es sinnvoll, diese zunächst parallel in verschiedenen Konzepten zu berücksichtigen und anschließend das *Auswählen und Bewerten* als separaten Schritt durchzuführen. Durch objektorientierte Modellierungswerzeuge ist eine frühzeitige rechnerinterne Abbildung und Gegenüberstellung verschiedener Modularisierungskonzepte möglich (Stechert und Franke 2009).

Die Modularisierungskonzepte müssen hinsichtlich der anfangs festgelegten und gewichteten Ziele gegeneinander bewertet werden. Zur Beurteilung der Robustheit eines Modularisierungskonzepts bietet es sich an, die Abhängigkeiten zwischen Modulen zu bewerten. Dabei wird z. B. eine Einflussmatrix (Ulrich und Eppinger 2008) der Module erstellt und die Zellen nach dem Prinzip „Zeile beeinflusst Spalte“ mit 0 und 1 ausgefüllt. So ergibt sich durch Addition der Zeilen die Aktivsumme bzw. durch Addition der Spalten die Passivsumme der Module. Module lassen sich dann in aktive und passive Module

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Aktivsumme}}{\text{Passivsumme}}$$

sowie kritische und träge Module

$$\text{Kritikalität} = \text{Aktivsumme} \cdot \text{Passivsumme}$$

klassifizieren. Unterliegen die Spezifikationen von kritischen und aktiven Modulen starken Schwankungen, ist die Robustheit der Modularisierung gefährdet und daher sollte die Anzahl kritischer Module möglichst gering sein. Für die am besten bewerteten Modularisierungskonzepte sollten schließlich die wesentlichen Produktvarianten, die später aus dieser Modularisierung entstehen sollen, bewertet werden. Die Varianten müssen im direkten Vergleich zu Wettbewerbern oder den Vorgängerprodukten weiterhin gut abschneiden, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

Das *Erstellen der Gesamtentwürfe und Ausarbeiten von Fertigungsunterlagen* folgt im Wesentlichen dem früher in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehen für die Baukastenentwicklung. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Ausgestaltung jedes einzelnen Moduls hinsichtlich der zuvor für dieses Modul als wesentlich identifizierten Modultreiber erfolgt.

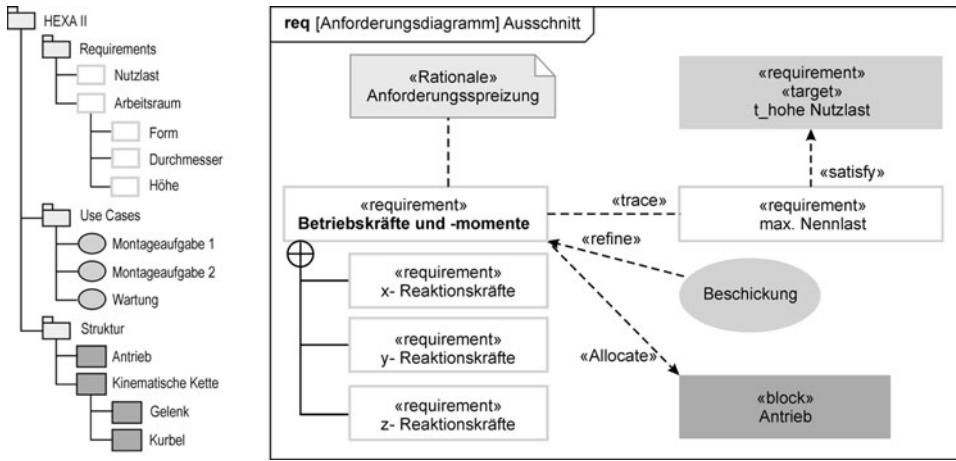
#### 17.1.4.2 Beispiel

**Baukastensystem für Robotergestelle** Robotersysteme für Handhabung und Montage werden zum Teil als Parallelstrukturen ausgeführt, um durch geringe bewegte Massen eine hohe Dynamik zu erzielen (Schütz und Wahl 2010). Der Gestaltung der Gestelle kommt dabei eine große Bedeutung zu, da sie den zur Verfügung stehenden Arbeitsraum umschließen und einen Großteil zu den Gesamtkosten des Robotersystems beitragen (Stechert et al. 2010b).

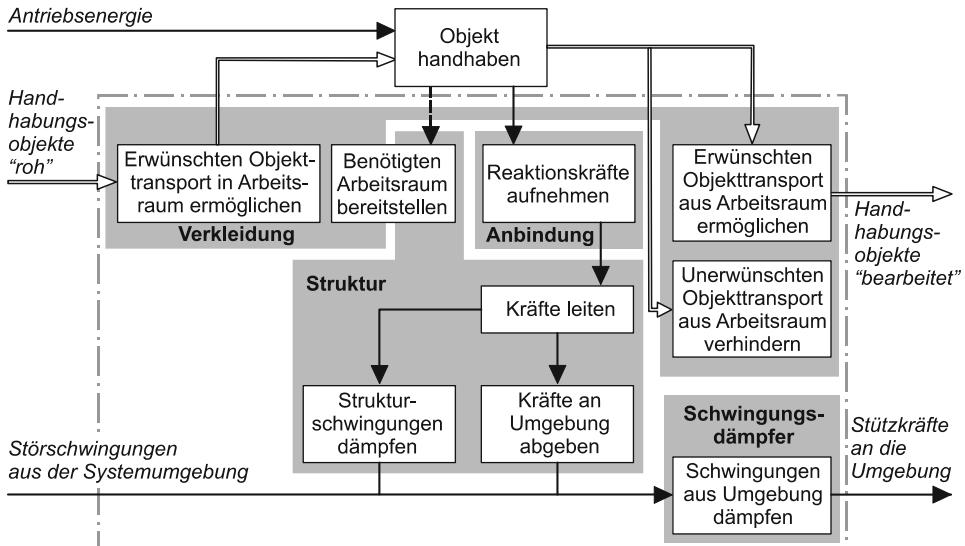
Dem *Klären der Aufgabenstellung* kommt hier eine besondere Bedeutung zu, da Robotersysteme häufig an eine konkrete Handhabungsaufgabe und die Aufstellsituation vor Ort angepasst werden müssen. Die Baukastenentwicklung soll im Wesentlichen auf eine Steigerung der Flexibilität in der Entwicklung und die Ermöglichung von Rekonfigurationen in der Nutzungsphase abzielen (Schmitt et al. 2012). Durch die Analyse der Anwendungsfälle und systematische Modellierung (s. Abb. 17.25) können Anforderungsspreizungen z. B. in Bezug auf die Arbeitsraumgröße, die Anbindungspositionen der Antriebe am Gestell oder die Zuführung der Handhabungsobjekte (z. B. durch Fließbänder) identifiziert werden. Dabei ist die Arbeitsraumgröße in der Entwicklung möglichst variabel zu halten, die Zuführung kann auf einige definierte Ausprägungen festgelegt werden und die Anbindungsposition der Antriebe sollte auch in der Nutzungsphase noch anpassbar sein.

Ist die Aufgabe geklärt, folgt das *Aufstellen von Funktionstrukturen bzw. Analysieren der Produktstruktur*. Abbildung 17.26 zeigt eine fröhe Funktions- und ihr überlagerte Produktstruktur. Dabei befinden sich nur die dem Gestell zuzuordnenden Funktionen innerhalb der Systemgrenze. Zur besseren Übersicht sind nur die wichtigsten Gestellfunktionen und zusätzlich die Hauptfunktion des Roboters „Objekt handhaben“ dargestellt.

Auf der Basis der Funktionsstruktur erfolgt das *Aufteilen in Module*. Hierzu werden verschiedene Konzepte aufgestellt. Ein Konzept soll im Folgenden beschrieben werden. Einfachstes Modul in diesem Konzept ist der Schwingungsdämpfer, der als Kaufteil in verschiedenen Größenabstufungen genutzt werden kann und durch Funktionsintegration (Schwingungen dämpfen, Eben ausrichten) die Komplexität des Systems reduzieren hilft. Eine Funktionstrennung wird beim Halten und Stützen und dem Anbinden der Roboterstruktur durchgeführt. Die Anbindung ist als Baustein mit mehreren Varianten für eine

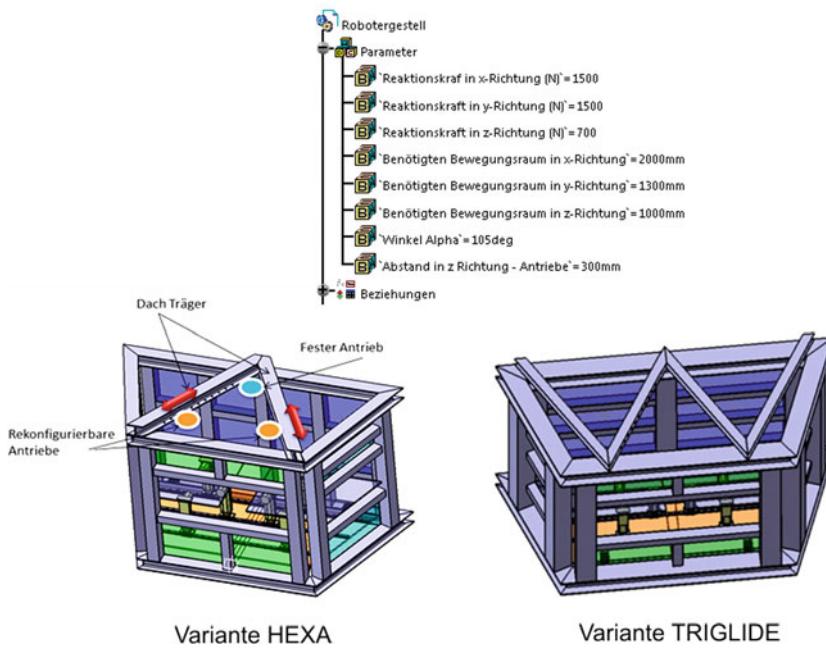


**Abb. 17.25** Ausschnitt aus einem objektorientierten Anforderungsmodell. Struktur der Objekte im Packagebrowser (*links*) und Visualisierung der Objekte und ihrer Beziehungen im Diagramm (*rechts*). Erkennbar ist die Darstellung von Anforderungsspreizungen bezüglich der Betriebskräfte hervorgerufen durch unterschiedliche Anwendungsfälle und Nutzlasten. Diese wirken sich auf die Wahl der Antriebe und somit auf die Gestaltung der entsprechenden Schnittstellen am Gestell aus



**Abb. 17.26** Funktionsstruktur und Definition der Bausteine

Reihe von Antrieben nutzbar. Sollten bisher nicht vorgesehene Antriebe verwendet werden, so können neue Varianten erzeugt werden, ohne weitreichende Änderungen der Struktur nach sich zu ziehen. Schließlich wird die Verkleidung zunächst als ein Modul auf organisatorischer Ebene betrachtet. Innerhalb der so definierten Module erfolgt eine weitere



**Abb. 17.27** CAD-Basismodell und Varianten des Robotergestells für verschiedene Robotertypen

Unterteilung. So besteht die Struktur beispielsweise aus horizontalen und vertikalen Trägern sowie Schubfeldern. Die Träger erhalten eine bestimmte Profilform und werden in festgelegten Stufensprüngen der Querschnittsfläche bereitgestellt. Die Länge der horizontalen Träger ergibt sich bei Konfiguration aus der Festlegung des Arbeitsraums, wird also in gewissen Grenzen variabel gehalten.

Es folgt das *Auswählen und Bewerten*. Hierzu werden aus den zu Beginn definierten Anforderungen Bewertungskriterien abgeleitet. Es lässt sich das Baukastensystem z. B. hinsichtlich der flexiblen Handhabung in der Entwicklung und der Realisierung der Rekonfiguration bewerten. Die Entwicklung wird unterstützt, da das beschriebene Konzept in einem vollparametrischen CAD-Modell abgebildet und so durch wenige Eingaben ein Robotergestell konfiguriert werden kann, welches beispielsweise einen bestimmten Bauraum und bestimmte Anbindungspunkte für die Antriebe bereitstellt. Die Rekonfiguration wird dadurch realisiert, dass die Antriebsadapter an anderen Stellen in der Struktur befestigt werden. Lediglich das Gestell muss bereits in der Entwicklung groß genug ausgelegt werden, so dass es ebenfalls den neuen Arbeitsraum umfasst. Ein weiteres Konzept hatte hier das Modul Struktur feiner aufgeteilt und lösbar Verbindungen zwischen ihnen vorgesehen, so dass die Größe und der Aufbau der Gestellstruktur ebenfalls rekonfigurierbar ist. Hier erhöht sich jedoch die Teilezahl und Komplexität deutlich. Außerdem ist zu erwarten, dass die Steifigkeit der Knoten und damit die Gesamtsteifigkeit der Struktur geringer ausfällt, wodurch die Genauigkeit bei der Objekthandhabung negativ beeinflusst würde. Letzteres

wird dann deutlich, wenn die Hauptvarianten des geplanten Produktspektrums mit Hilfe des Baukastens konzeptionell erstellt werden, so dass ebenfalls eine Bewertung der Produkte gegeneinander bzw. zu Vorgängerprodukten möglich wird.

Schließlich folgt das *Erstellen der Gesamtentwürfe und Ausarbeiten von Fertigungsunterlagen*. Abbildung 17.27 zeigt das vollparametrische CAD-Basismodell. In diesem Modell sind beispielsweise die zulässigen Trägerquerschnitte hinterlegt. Nach Eingabe der Arbeitsraumgröße und der maximalen Nutzlast werden im Modell automatisch die zu erwartenden Reaktionskräfte bestimmt, die Profilquerschnitte festgelegt und ggf. weitere Stützen eingefügt. Rechts dargestellt sind die sich aus dem Basismodell ergebenden Hauptgestellvarianten für die Roboterstrukturen Hexa (bzw. Delta) sowie vertikaler und horizontaler Triglide. Die Fertigungsunterlagen können nun aus den CAD-Modellen abgeleitet werden.

---

## Literatur

### Abschnitt 17.1

- Baumgart I (2004) Modularisierung von Produkten im Anlagenbau. Verlag Mainz, Aachen
- Beitz W, Keusch W (1973) Die Durchführung von Gleitlager-Variantenkonstruktionen mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitungsanlagen. VDI-Berichte Nr 196. VDI Verlag, Düsseldorf
- Blees C, Jonas H, Krause D (2008) Entwurf von modularen Produktarchitekturen unter Betrachtung unterschiedlicher Unternehmenssichten. Design for X, Neukirchen, S 149–158
- Braess H-H, Seiffert U (2011) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Breidert J (2006) Schnittstellengestaltung für die Baukastensynthese mit Beispielen aus der Formgedächtnisaktorik. Shaker, Aachen
- Cornet A (2002) Plattformkonzepte in der Automobilentwicklung. Dt. Univ.-Verlag, Wiesbaden
- DIN 323, Blatt 2 (1974) Normzahlen und Normzahlreihen (mit weiterem Schrifttum). Beuth, Berlin
- Ericsson A, Erixon G (1999) Controlling design variants: modular product platforms. SME, Dearborn
- Eversheim W, Wiendahl HP (1971) Rationelle Auftragsabwicklung im Konstruktionsbüro. Girardet Taschenbücher, Bd 1. Girardet, Essen
- Flender (1972) Firmenprospekt Nr K 2173/D. Bocholt
- Franke H-J, Firchau NL (2002) Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Carl Hanser, München
- Franke H-J, Grein G, Türk E (2011) Anforderungsmanagement für kundenindividuelle Produkte. Shaker, Aachen
- Friedewald H-J (1970) Normung integrieren – der Bestandteil einer Firmenkonzeption. DIN-Mitteilungen 49(1)
- Gerhard E (1984) Baureihenentwicklung. Konstruktionsmethode Ähnlichkeit. Expert, Grafenau
- Göpfert J (1998) Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden
- Göpfert J, Steinbrecher M (2000) Modulare Produktentwicklung leistet mehr. Harv Bus Manag 3:20–30
- Haf H (2001) Plattformbildung als Strategie zur Kostensenkung. VDI Berichte 1645, S 121–137

- Kraus PK (2005) Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wert schöpfung. Meisenbach Verlag Bamberg
- Kroker J (2005) Schnittstellensystematik für modulare Fahrzeugkarosserien. Logos, Berlin
- Krusche T, Franke H-J, Koschorrek R (2004) Innovative Leichtbaukonzepte – Ermittlung weiterführender Ansätze für zukünftige Karosseriekonzepte. VDI, Hamburg
- Müller M (2000) Management der Entwicklung von Produktplattformen. Difo-Druck OHG, Bamberg
- Nehuis F, Stechert C, Vietor T (2011) Werkzeugunterstützung bei der Ermittlung von Anforderungen für regionsspezifische Fahrzeugkonzepte. Design for X, Tutzing
- Pahl G, Beitz W (1974) Baureihenentwicklung. Konstruktion 26:71–79, 113–118
- Piller FT, Waringer D (1999) Modularisierung in der Automobilindustrie – neue Form und Prinzipien. Shaker, Aachen
- Prüß H, Stechert C, Vietor T (2010) Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen. Design for X, Buchholz
- Rathnow PJ (1993) Integriertes Variantenmanagement: Bestimmung, Realisierung und Sicherung der optimalen Produktvielfalt. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen
- Renner I (2007) Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Verlag Dr. Hut, München
- Schmitt J, Inkermann D, Stechert C, Raatz A, Vietor T (2012) Requirement oriented reconfiguration of parallel robotic systems. In: Dutta A (Hrsg) Robotic systems – applications, control and programming. InTech
- Schütz D, Wahl F (2010) Robotic systems for handling and assembly (STAR 67). Springer, Berlin
- Stake RB (2000) On conceptual development of modular products: development of supporting tools for the modularisation process. The Royal Institute of Technology, Stockholm
- Stang S, Hesse L, Warnecke G (2002) Plattformkonzepte. Eine strategische Gratwanderung zwischen Standardisierung und Individualität. ZWF 97(3):110–115
- Stechert C, Franke H-J (2009) Requirements models for modular products. International conference on research into design, S 411–418
- Stechert C (2010a) Modellierung komplexer Anforderungen. Verlag Dr.-Hut, München
- Stechert C, Franke H-J, Vietor T (2010b) Knowledge-based design principles and tools for parallel robot. Robotic systems for handling and assembly (STAR 67), Springer Verlag, Berlin, S 59–75
- Ulrich K (1995) The role of product architecture in manufacturing firm. Res Policy 24(3):419–440
- Ulrich KT, Eppinger SD (2008) Product design and development. Irwin/McGraw-Hill, New York
- Werkbild AEG-Telefunken: Hochspannungs-Asynchron-Normmotoren, Baukastensystem, 160 kW–3150 kW. Druckschrift E 41.01.02/0370

---

# Sachverzeichnis

## A

ABC-Analyse, 150  
Ablagerungskorrosion, 612  
Ablauforganisation, 31  
Abstraktion, 287  
Additive Manufacturing, 49, 52,  
    97, 98  
    Innovationspotenziale, 49  
Adhäsionsverschleiß, 620  
Ähnlichkeit  
    bei konstanter  
        Beanspruchung, 822  
    dynamische, 821  
    kinematische, 821  
    thermische, 821  
Ähnlichkeitsbeziehungen, 822  
Ähnlichkeitsgesetze, 820, 830  
Ähnlichkeitskalkulation, 148  
Änderungsantrag, 117, 226  
    Genehmigung, 120  
Änderungsauftrag, 120  
    Genehmigung, 122  
Änderungsmanagement  
    Begriffsdefinition, 113  
    integriertes, 117  
    Referenzprozess, 115  
    von Anforderungen, 339  
Änderungsprozess, 113  
    Rechnerunterstützung, 123  
    Workflow-gesteuerter, 123  
Äquivalenzziffernkalkulation, 130  
Ästhetik, 675  
Algorithmus des erfinderischen  
    Problemlösens, 363  
Altstoffgruppe, 732  
Altstoffrecycling, 730

Analogiebetrachtung, 811  
Anforderung  
    Softwaretools, 340  
Anforderungsbeschreibung, 337  
Anforderungsliste, 324, 342  
    Erarbeitung, 325  
Anforderungsquelle, 327  
Anforderungsspreizung, 847  
Animation, 428  
Anpassungskonstruktion, 293  
Ansaugkrümmer, 79  
Apparat, 238  
Arbeitnehmererfindergesetz, 212  
Arbeitsschritt, 12  
Arbeitsschutzmanagement, 171  
Arbeitstechnik  
    opportunistische, 283  
    systematisch-methodische, 285  
Arbeitsteilung, 11, 290  
Argumentenbilanz, 387  
Aufbauorganisation, 31  
Aufgabenteilung, 553, 554  
Augmented Reality, 334  
Ausdehnung, 585  
    instationäre, 586  
    stationäre, 586  
    von Bauteilen, 586  
Ausdehnungskoeffizient, 588  
Ausdehnungszahl, 593  
Ausgleichsgewicht, 521  
Ausschließlichkeitsrecht, 200  
Automatisierung, 711

**B**  
Balance3D, 400  
Baugruppe, 257, 265, 343

- Baugruppengestaltung, 716  
Baukästen, 838  
Baukastenprinzip, 719, 720  
Baukastensystem, 818, 819, 842  
    Entwicklung, 844  
    Kostenminimierung, 851  
Baureihen, 820  
    Entwicklung, 835  
    geometrisch ähnliche, 827  
    halbähnliche, 830  
Baustruktur, 239, 251, 255, 853  
Bauteilgeometrie, 723  
Bauteiloptimierung, 643  
Bauteilsynthese  
    funktionsflächenbezogene, 659  
    tragwerksbezogene, 656  
Benchmark-Test, 434  
Benchmarking, 151  
Benefit Asset Pricing Model, 108  
Berichtigungsmanagement, 450  
Beschaffung, 224  
Beschichten, 695  
Betriebsanleitung, 531  
Betriebsanweisung, 531  
Betriebskosten, 130  
Betriebswirtschaftslehre, 108  
Bewertungskriterien, 383  
Bewertungsverfahren, 381  
    Überprüfung der Ergebnisse, 401  
    komplexes, 395  
    universelle, 390  
    Vorauswahl von Lösungsvarianten, 386  
Bezugsgrößenmenge, 149  
Bill of Materials, 452  
Bionik, 351  
Biot-Zahl, 831  
Bistabilität, 573, 575  
Black Box, 240  
Blech, 622  
    Prozesskette, 627  
Blechbearbeitung, 623  
Blechkonstruktion, 623  
Blocksetzen, 571  
Boolesche Operation, 420  
Boolescher Baum, 420  
Bottom-Up-Konstruktion, 431  
Brainstorming, 354, 360  
Bramme, 622  
Bredtschneider-Uhde-Verschluss, 562  
Bremswirkung, 522  
Broker, 8  
Brutto-Werkstoffkosten, 138  
Business-to-Business-Geschäft, 292
- C**  
3D-CAD-Modell, 425, 431  
CAD-Datenaustausch, 431  
CAD-System, 8, 52, 416  
CAM-Schnittstelle, 627  
Cash Cows, 307  
Cauchy-Bedingung, 822, 830  
Change Order Request, 226  
Client-Server-Architektur, 106  
Closed Volume, 419  
CO2-Laser, 629  
Coil, 622  
Common Mode Failure, 522  
Computational Fluid Dynamics (CFD), 441  
Computer-Aided Design (CAD), 278, 414  
Computer-Aided Manufacturing, 419  
Concurrent Engineering, 31, 819  
Conformal Cooling, 85  
Content-Management-System, 101, 105  
Corporate Identity, 103
- D**  
3D-Digitalisierung, 54  
Datenaustausch, 52, 432  
De-facto-Norm, 191  
Delphi-Methode, 358  
Demand-Pull, 310  
Demontage, 734  
Denken  
    divergentes, 288  
    konvergentes, 289  
Design Review, 46, 755, 756  
    ereignisgesteuerte, 757  
    zeitgesteuerte, 757  
Design-to-Cost, 147, 266  
Design to Customer, 775, 780  
Detaillierungsmethode, 332  
Deutsche Normungsstrategie (DNS), 195  
Development of Alternative Solutions, 116  
Diensterfindung, 212  
Differentialbauweise, 839, 851  
Digital Light Processing, 58  
Digital Mock-Up, 415, 427  
DIN EN, 166

- DIN EN ISO, 166  
DIN SPEC, 167  
DIN/DIN VDE, 165  
DITR-Datenbank, 176, 178  
Diversifikation, 5, 818  
Divisionskalkulation, 130  
Dokumentenmanagement, 449  
Dokumentenmanagementsystem, 100, 105  
Drahtmodell, 419  
Drawing Interchange Format, 432  
Drucken, dreidimensionales, 63
- E**  
Effekt, physikalischer, 247  
EG-Maschinenrichtlinie, 506  
Eigenfertigung, 804  
Eigenschaftsverbesserung, 68  
Einmalkosten, 141  
Einzelkosten, 127  
Einzelteilgestaltung, 715  
Electrosetting, 67  
Elektronikkomponente, 6  
Endprodukt, 90  
Energieausfall, 522  
Energiefluss, 241  
Energiemanagement, 171  
Energieumsatz, 240, 241  
Engineering Change Management, 110, 116  
Engineering Change Order, 118, 120  
Engineering Change Request, 116, 118  
Engineering Data Management, 443  
Engineering Implementation of Change, 116  
Enterprise Resource Planning (ERP),  
    10, 105, 451  
Entwicklungs- und Konstruktionsprozess,  
    13, 14  
    Fehlererkennung, 39  
    Hilfsmittel, 412  
    Multidimensionale, 413  
    V-Modell, 18  
Entwicklungsänderung, 115  
Entwicklungskooperation, 213  
Entwicklungsprozess  
    Analogiebetrachtung, 812  
    Rationalisierung, 777  
    Rechnerunterstützung, 398  
Entwurfsziel, 738  
Ergonomie, 500
- Erlebnismarkt, 124  
Erosionskorrosion, 615  
Erwärmungskurve, 594  
Europäische Normen (EN), 185  
Evaluator, 399  
Evolution, 368  
Exponentengleichung, 832
- F**  
Fügestelle, aufbereitungsgerechte, 732  
Fügeverfahren, 632, 696, 706  
Führungstil, 35  
Facettenmodell, 54  
Faktorisierung, 289  
Faser-Kunststoff-Verbund, 648  
Faserverbundstruktur, 654, 660  
Feature, 781  
Feature-Klassen, 422  
Fehler  
    produktbezogene, 38, 755  
    verfahrensbezogene, 755, 761  
Fehlerbaumanalyse, 39, 41, 757  
Fehlererkennung, 39  
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse  
    (FMEA), 42, 382, 757  
Feingießen, 73  
Feingießen, 75  
Fertigung, 682  
Fertigungsbaustein, 842  
Fertigungsplanung, 224  
Fertigungsprozess, 683  
Fertigungsprozessschritte, 45  
Fertigungstiefe, 7  
Fertigungsunterlagen, 852  
Fertigungsverfahren  
    additives, 49, 50  
    Einsatzbereiche, 639  
    generatives, 49, 56, 68  
Fertigungszeit, 94  
Festigkeitsverlauf, 598  
Finite-Elemente-Methode, 8, 48, 437, 657  
Flächenkorrosion, 608  
Flächenmodell, 54, 419  
Fliehkraft, 521  
FMEA-Formblatt, 43  
Formgebung, 675  
    Richtlinien, 679  
Formungslehre, 16  
Forward Engineering, 52, 54

- Fremdfertigung, 804  
Function Analysis System Technique, 346  
Function Sharing, 263  
Funktion  
    ästhetische, 313  
    produktsprachliche, 313  
Funktionsbaustein, 838, 842  
Funktionsgestalt, 678  
Funktionsintegration, 866  
Funktionskosten, 851  
Funktionsmängel, 39  
Funktionsstruktur, 237, 242, 255, 265,  
    344, 675, 847, 865  
Funktionstrennung, 866  
Funktionsumfang, 273  
Fused Layer Modeling/Manufacturing, 62
- G**  
Galeriemethode, 357  
Galvanotechnik, 696  
Gasphasenabscheidung  
    chemische, 696  
    physikalische, 695  
Gebilde, technische, 238  
Gebrauchsmuster, 208, 220  
Gefährdung, 510  
    deterministische, 524  
    stochastische, 519  
Gefährdungsanalyse, 518  
Gefahr, 510  
Gemeinkosten, 128  
    Normung, 157  
    Verwaltung, 157  
GenerativesVerfahren, 49  
Geometrie, 780  
    Datenaustausch, 432  
    Eigenschaften, 683  
    eines Bauteils, 12  
Geometriemodell, 419, 427  
Gerät, 238  
Gesamtfunktion, 244  
Geschäftsprozess  
    Normeninformationen, 172  
Geschehen, physikalisches, 247  
Geschmacksmuster, 208  
Gestaltfestigkeit, 541  
Gestaltung  
    Eindeutigkeit, 494  
    Einfachheit, 501  
    fehlerarme, 578  
    instandhaltungsgerechte, 727  
    klebgerechte, 697  
    kraftflussgerechte, 542  
    mit Blech, 626  
    recyclinggerechte, 732  
    schrittweise, 479  
    schweißgerechte, 696  
    Sicherheit, 505  
    Top-Down-Prozess, 471  
Gestaltungskonzept, 341  
Gestaltungsprinzip, 494, 539, 540  
Gestaltungsprozess, 465  
Gestaltungsrichtlinien, 494, 584  
Gewinn, 124  
Glasfaser, 651  
Glasfaserverstärkung, 651  
Gleitlager-Baukastensystem, 848  
Globalisierung, 5, 224, 818  
Größe-Zeit-Kosten, 364  
Grünling, 63, 86  
Grenztemperatur, 598  
Guidance on Social Responsibility, 170
- H**  
Halbleiterschutz, 208  
Handhabung, 705  
Hauptmerkmalliste, 330  
Hauptschalter, 534  
Herstellkosten, 29, 148, 150  
High Speed Cutting, 52  
Hilfsprozess, 709  
Hochleistungsbauteile, 654  
Hooke'sches Gesetz, 598  
Hookscher Effekt, 248  
House of Quality, 758  
Hybridbauweise, 87
- I**  
Idealität, 364  
Identification of Potential for Change, 116  
Imitationswettbewerb, 219  
Inbetriebnahme, 708  
Indirektes Metall Lasersintern, 85  
Industrial Design, 414, 675  
IndustrialDesign, 313  
Industrieroboter, 429  
Info-Pool, 315  
Informations-Feature, 422

- Informationsquelle, künstliche, 531  
Informationstechnologie, 8  
Initial Graphic Exchange Specification, 431  
Innovation, 294  
    Checkliste, 363  
    Controlling, 318  
    Roadmap, 318  
Innovationsgrad, 293  
Innovationsplanung, 302  
Innovationsprozess, Normung, 186  
Input-Output-Modell, 345  
Inspektion, 728  
Instandhaltung, 726  
Instandsetzung  
    ausfallbedingte, 727  
    präventive, 727  
Intellectual-property-Strategie, 193  
Interaktion, 663  
International Patent Classification (IPC), 222  
Investitionsplanung, 309  
ISO-Strategie, 198  
Iteration, 663, 809  
    äußere, 777  
    innere, 777  
Iterationsschritte, 20
- J**  
Justage, 708
- K**  
Käufermarkt, 124  
Kann-Baustein, 844  
Kantenmodell, 419  
Katalog, 375  
Kaufkraftaufkommen, 818  
Kavitationskorrosion, 615  
Keltool-/Course4 Technology Prozess, 83  
Kennzeichen  
    bedienungsorientierte, 678  
    formgebungsgerechte, 677  
    markt- und benutzungsorientierte, 678  
    zweckorientierte, 678  
Kennzeichenschutz, 210  
Kennzeichnungsgestalt, 678, 679  
Kilokostenverfahren, 147  
Klebegeometrie, 699  
Klebstoff, 660, 700  
Kompatibilitätsnorm, 187  
Komplexität, 6  
Konfigurationslogik, 270  
Konfigurationsmanagement, 10, 449, 783, 792, 793, 802  
Konkurrenzprodukt, 350  
Konstruieren, 11  
    sicherheitsgerechtes, 505  
Konstruktion  
    korrosionsverträgliche, 606  
    montagegerechte, 713  
    Qualitätssicherung, 753  
Konstruktions-Review, 757  
Konstruktionsarbeitschritt, 13  
Konstruktionsfreiheit, 94  
Konstruktionskatalog, 377  
Konstruktionsmethodik, 14, 361  
Konstruktionsprozess  
    agiler, 809  
    Recyclingorientierung, 732  
Konstruktionsstückliste, 455  
Kontaktkorrosion, 611  
Kopplung, funktionelle, 530  
Korrosion, 605  
    an Phasengrenzen, 612  
    beanspruchungsabhängige, 613  
    dehnungsinduzierte, 614  
    freier Oberflächen, 608  
    selektive, 616  
Korrosionsbeständigkeit, 606  
Kosten, fixe, 127  
Kostenarten, 134  
Kostenartenrechnung, 126  
Kostenkalkulation, 140  
Kostenmanagement, 124  
Kostenoptimierung, 266  
Kostenplanung, 29  
Kostenrechnung, 125, 152  
Kostenreduktion, 6  
Kostenstellenrechnung, 127  
Kostenstruktur, 132  
Kostenträgerrechnung, 130  
Kraft-Verformungs-Diagramm, 564  
Kraftfluss, 552  
    Hüllfläche, 552  
Kraftleitung, 541, 551  
Kreativitätstechnik, 350  
Kreuzlizenzierung, 223  
Kriechen

- bei Raumtemperatur, 599  
oberhalb der Grenztemperatur, 600  
unterhalb der Grenztemperatur, 599
- Kunde  
anonymer, 328  
spezifischer, 329
- Kunden-Lieferanten-Beziehung, 102
- Kundenart, 328
- Kundeneintegration, 292
- Kundenorientierung, 292
- Kundenwünsche, 302, 335
- Kundenzufriedenheit, 335
- Kunststoff, glasfaserverstärkter, 651
- Kunststoffschweißmaschine, 525
- L**
- Längenausdehnungszahl, 586
- Lösungsfindungsprozess, 380
- Laminated Object Manufacturing, 66
- LaserCusing, 96
- Laser Cusing, 87
- Laser-Sintern, 59, 73, 80
- Laserschneiden, 628
- Lastenheft, 320
- Layer Laminated Manufacturing, 66
- Layer Manufacturing, 51
- Lead User, 329, 336
- Lean Production, 33
- Lebenszykluszeit, 132
- Leckage, 522
- Leichtbaustruktur, 654, 656
- Leistungsverteilung, 559
- Leistungsverzweigung, 558
- Leitstützstruktur, 480, 486
- Leitungsbruch, 522
- Lernkurve, 773
- Lesen, perspektivenbasiertes, 332
- Lieferantenstruktur, 274
- Life Cycle Costing, 131
- Linienmodell, 419
- Lizenzregel, 192
- Lochkorrosion, 610
- M**
- Make-or-Buy-Entscheidung, 272
- Managementsystem, Normung, 169
- Manufacturing Implementation of Change, 116
- Markenschutz, 210
- Markteintrittsfenster, 318
- Markup, 447
- Maschine, 238
- Maschinensicherheitsnorm, 509
- Masken-Sintern, 59
- Mass Customization, 770
- Materialkosten, 130, 147
- Materialrecycling, 730
- Matrixwerkstoff, 732  
polymerer, 653
- Maß-Zeit-Kosten, 364
- Maßkorrektur, 95
- Maßzahlvergabe, 393
- Mechatronik, 6
- Mehrkörpersimulation, 8, 48
- Mehrkörpersystem, 443
- Mensch-Maschine-Beziehung, 500
- Mess- und Prüfnorm, 189
- Methode 635, 357
- METUS-Methodik, 276
- Mischbauweise, 660
- Mixed Reality, 334
- Modell  
multidimensionales, 420  
semantisches, 436
- Modellversuch, 353
- Modul, 258, 265  
funktionale Kapselung, 265
- Modularisierung, 261, 859, 860,  
865, 866
- Modularität, 258, 860
- Module Indication Matrix, 866
- Modulgestaltung, 717
- Modultreiber, 860, 861
- Montage  
Automatisierungsgrad, 710  
mechatronische Strukturen, 720  
Toleranzmanagement, 721
- Montage-Roboter, 429
- Montagelinie, 715
- Montageoperation, 702
- Montageprozess, 712
- Montagesystemgestaltung, 703
- Morphologischer Kasten, 373
- Muldenkorrosion, 609
- Multi-Jet Modeling, 62
- Multi-Life-Produkt, 300
- Muss-Baustein, 844

**N**

Navier-Stokes-Gleichung, 441  
NC-Programmierung, 429  
Nd: YAG-Festkörperlaser, 629  
Negation, bewusste, 288  
Netto-Projektkosten, 811  
Netzplan, 27  
Neukonstruktion, 292  
New Approach, 184  
Nichtbaustein, 842  
Normenbereitstellung, 172  
Normeninformation, 172  
Normeninformationsdatenbank, globale, 176  
Normeninhalt, Zugriff, 178  
Normenmanagement, 174  
Normentstehung, 161  
Normstrategie, 305  
Normung, 155  
    als strategisches Instrument, 194  
    betriebswirtschaftlicher Nutzen, 181, 183  
    entwicklungsbegleitende, 190  
    europäische, 163  
    Innovationsprozess, 186  
    internationale, 163  
    Kernaufgabe, 189  
    Managementsysteme, 169  
    normungspolitisches Konzept der Bundesregierung, 197  
    Normungsstrategie des BDI, 198  
    Rechtssicherheit, 183  
    Spezifikationen, 164  
    strategische, 155  
    volkswirtschaftlicher Nutzen, 179  
Normungsorganisation, 155, 508  
Normungsprozess, 159  
Normungsstrategie, 217  
Normzahldiagramm, 825, 827  
Normzahlreihen, 826  
    dezimalgeometrische, 823  
Not-Halt-Schalter, 534  
Nutzwertanalyse, 274, 388, 390, 392

**O**

Objektformulierung, 364  
Offline-Programmiersystem, 429  
Offshoring, 8

**O**rdnungsschema, 372

Original Equipment Manufacturer(OEM), 9  
Outsourcing, 8, 819

**P**

3D-Printing, 63  
Parametrieren, 708  
Partialmodell, 421, 436  
Patent, 191, 193, 199, 203, 220  
    Kosten-Nutzen-Analyse, 217  
Patentanspruch, 205  
Patentdatenbank, 221  
Patentportfolio, 217  
    kreuzlizenziertes, 223  
Patentrecherche, 221  
Patentrecht, 191  
Patentschutz, 206  
Patentzusammenarbeitsvertrag, 206  
Pflichtenheft, 320  
Phasenmodell, 421  
Pionierprodukt, 216  
Plattform- und Baukastenkonzept, 141  
Plattformbauweise, 856  
Poly Jet Modeling, 58, 65  
Polymerisation, 57  
Poor Dogs, 307  
Portfolio, 305  
Portfolio-Matrix, 305  
Präferenzmatrix, 388, 395  
Preiskalkulation, 125  
Prinzip der Selbstverstärkung, 520  
Problemanalyse, 286  
Problemformulierung, 364  
Product Data Management, 278, 411  
Product Lifecycle Management, 416  
Produkt  
    analoges, 813  
    digitales, 784  
    Entwicklungs dauer, 6  
    Funktion, 242  
    funktionale Beschreibung, 344  
    Gestaltung, 463  
    Globalbetrachtung, 467  
    individuelles, 254  
    Innovationsgrad, 5  
    Modularität, 860  
    montagegerechte, 712  
    Neuheitsgrad, 293  
    Verhalten, 245

- Produktänderung, 111  
Produktanforderung, 323  
Produktarchitektur, 9, 137, 243, 252, 341, 467, 859  
Definition, 255  
Gestaltung, 264  
integrale, 258, 263  
Methodik, 276  
modulare, 258, 261, 860  
Optimierung, 274  
Softwareunterstützung, 276  
Produktaufwertung, 861  
Produktdaten, 14  
Produktdatenmanagement, 100, 224, 299, 415, 443  
Produktdefinition, 464  
Produktdokumentation, 99  
externe technische, 101, 105  
interne technische, 100, 105  
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, 107  
Produktentstehungsprozess, 9, 11, 31, 113, 339, 776, 792  
Normung, 152, 186  
Produktentwicklung, 18  
Anforderungsliste, 321  
Entwicklungsteam, 32  
integrierte, 19  
kooperative, 299  
Qualitätssicherung, 753  
virtuelle, 9, 48  
wirtschaftlicher Modell- und Prototypenbau, 93  
Produktentwicklungsprozess, 381  
Aufgabenstellung, 319  
Rolle von Patenten, 220  
Produktfamilie, 805  
Produktfeature, 780, 781  
Produktgeometrie, 422, 791  
Produktgestaltung, 717  
automatisierungsgerechte, 723  
demontagefreundliche, 724  
handhabungsgerechte, 723  
montagegerechte, 710  
Produktgestaltungselement, 856  
Produktgliederung, 473  
Produkthaftung, 103  
Produktidee, 311, 315  
Produktinnovation, 293, 313  
Produktions-, Planungs- und Steuerungssystem (PPS), 105  
Produktionsabfallrecycling, 730  
Produktionslinie, 141  
Produktionsplanungssystem, 10, 472  
Produktiteration, 295  
Produktkosten, 125  
Einflussfaktoren, 135  
im Entwicklungsprozess, 143  
Stückzahl, 140  
Produktlebenszyklus, 296, 708  
betriebswirtschaftlicher, 296  
intrinsischer, 297  
technologischer, 297  
Produktlebenszyklusmanagement (PLM), 297, 298  
Produktmanager, 290  
Produktmodell, 421  
Produktmodellierung, virtuelle, 8  
Produktnutzung, 339  
Produktplanung, 292, 319  
Durchführung, 301  
Produktplattform, 858  
Produktporfolio, 319  
Produktrecycling, 730  
Produktstruktur, 225, 255, 257, 265, 449, 470, 865  
Produktverfolgung, 302  
Produktvielfalt, 254, 268  
Produktvorschlag, 317  
Produktwissen, 782  
Produzentenhaftungsrecht, 184  
Prognose, kalkulierte, 510  
Projektkosten, 29, 810  
Projektleiter, 35  
Projektmanagement, 26  
Prototyp, 77, 334  
Prozess-Audit, 122  
Prozesselement, 109  
Prozesskette, 68, 683  
generative, 68  
metallische Bauteile, 71  
Prozesskostenrechnung, 128  
Prozessmanagement, 448  
Prozessmodell, 16, 21  
Prozessphasen, 22  
Punktbewertung, 387  
Punktewolke, 54, 82

**Q**

- Qualitätsmanagement, 103, 170, 762  
Qualitätsmanagement-Handbuch (QMH), 762  
Qualitätssicherung, 753  
Qualitätswert, 323  
Quality Function Deployment, 302, 758  
Quality Gate, 753  
Quantitätswert, 323  
Question Marks, 307

**R**

- Rückverfolgung, 324  
Rückwärtsschreiten, 289  
Radial- und Axialkraft, 557  
Rahmentragwerk, 657  
Rangfolgeverfahren, 395  
Rapid Manufacturing, 51, 76, 89, 791  
Rapid Prototyping, 8, 48, 51, 76, 77, 415, 417, 428, 791  
Rapid Technologie, 75  
Rapid Tooling, 8, 51, 76, 81, 415, 428, 791  
direktes, 85  
Rationalisierung, 773, 775, 838  
Produktarten, 817  
Referenzvariante, 794  
Realität, virtuelle Siehe Virtual Reality, 425  
Reality Simulator, 426  
Rechtschutz, gewerblicher, 201  
Rechtssicherheit, 509  
Recycling, 151, 500, 504, 585, 729  
Recyclingkreislauf, 730  
Redaktionssystem, 105, 106  
Referenzproduktstruktur, 795, 798  
Referenzvariante, 803  
Reibkorrosion, 615  
Relativausdehnung, 591  
instationäre, 594  
Relativkosten, 140  
Relativkostenkalkulation, 149  
Relativverformung, 545  
Relaxation, 601  
Rendite-Risiko-Profil, 108  
Ressourcenallokation, 309  
Ressourcencheckliste, 363  
Reverse Engineering, 54, 151  
Risiko, 37, 510, 512, 736  
Dokumentation, 517  
Prioritätszahl, 43

**tolerierbares, 512**

- Risikobegegnung, 737  
Risikobewertung, 512  
multiplikative, 516  
Risikograph, 516  
Risikomanagement, 22, 26, 36, 170  
Risikovermeidung, 37  
Robotersystem, 867

**S**

- Safety, 505  
Sandgießen, 72  
Schachtelbauweise, 719  
Schalenträgerwerk, 657  
Schichtbauweise, 719  
Schnittstellen, technische, 862  
Schnittstellenmatrix, 866  
Schrauben, 707  
Schubfelder, 625  
Schutzeinrichtung, 527  
Schutzrechte, 191, 192  
gewerbliche, 199, 202, 213  
Inhaber, 203  
technische, 214  
Schwachstellenanalyse, 286, 403  
Schwingungsrißkorrosion, 613  
Security, 505  
Selbsthilfe, 520, 561, 566  
Selbstkosten, 29  
Selbstverstärkung, 565  
Selective Laser Melting, 87, 99  
Selective Laser Sintering, 59  
Sensitivitätsanalyse, 403  
Separationsprinzipien, 365  
Sheet-Moulding-Compound-(SMC-)Verfahren, 653  
Shell-cracking, 74  
Sicherheit, 524  
inhärente, 507  
integrierte, 507  
Sicherheitsbewußtsein, 531  
Sicherheitsbremsung, 522  
Sicherheitsfachgrundnorm, 508  
Sicherheitsgrundnorm, 508  
Sicherheitstechnik  
hinweisende, 531  
mittelbare, 526  
unmittelbare, 525

- Sicke, 625  
 Signalfluss, 241  
 Signalumsatz, 240  
 Simultaneous Engineering, 31, 35, 778  
 Situation, handlungsbezogenen, 510  
 Situationsanalyse, 306  
 Skalierung, multidimensionale, 401  
 SLA-Verfahren, 78  
 Slice-Prozess, 54  
 SLS-Verfahren, 99  
 SoftTooling, 8  
 Softwareentwicklung, 808  
 Softwarekomponente, 5  
 Solid Foil Polymerisation, 67  
 Solid Freeform Manufacturing (SFM), 51  
 Solid Model, 52  
 Sonderbaustein, 848  
 Sonderoperation, 709  
 Spaltkorrosion, 610  
 Spannkraft, 521  
 Spannungsrisskorrosion, 614  
 Specification and Decision on Change, 116  
 Speicheraufgabe, 540  
 Spin-Casting, 82  
 Stückkosten, 141  
 Stückliste, 453  
 Stücklistenänderung, 112  
 Stückzahl, 141  
 Stabilität, 573  
 STandard for the Exchange of Product Model  
     Data (STEP), 432  
 Standardproduktstruktur, 788  
 Stanz-Laser, 631  
 Stars, 307  
 Stereolithografie, 57, 428  
 STL-Datenformat, 54  
 Stoff-Feld-Modell, 366  
 Stoffumsatz, 240, 241  
 Storchenschnabelkonstruktion, 820  
 Strömungsmechanik, numerische, 441  
 Strömungstechnik, numerische, 437  
 Strahlschmelzen, 61, 86  
 Stromausfall, 522  
 Strukturanalyse, 27, 286, 352  
     Finite-Elemente-Methode (FEM), 438  
 Strukturbauteil, Verstärkungsfasern, 651  
 Strukturperformanz, 390  
 Strukturstückliste, 225, 794  
 Stufenexponent, 833  
 Styling, 314  
 Subtract-and-Operate-Methode, 346  
 Suchstrategie, 309  
 Symmetrielinie, 590  
 Synektik, 359  
 Synthese, 287  
 Systematisieren, 290  
 Systemlieferant, 272  
 Systems Modeling Language, 847  
 Systemsimulation, 437, 442  
 Systemtechnik, 238  
 Systemzusammenhang, 251  
 Szenariotechnik, 330
- T**  
 Tabellenkalkulationsprogramm, 398  
 Target Costing, 143, 147  
 Team-Data-Management (TDM), 105  
 Teamleitung, 36  
 Technische Regeln, 509  
 Technologie-Lebenszyklus, 297  
 Technologiefrüherkennung, 310  
 Technologieportfolio, 307  
 Technology-Push, 310  
 Teilequalität, 711  
 Terminologienorm, 188  
 Theorie des erforderlichen Problemlösens, 361  
 Time to Market, 19, 22, 123, 253, 775, 778  
 Toleranzen, 139  
 Toleranzmanagement, 722  
 Top-Down-Konstruktion, 429  
 Top-Down-Lesen, 332  
 Torsionsverformung, 548, 559  
 Total Cost of Ownership, 131  
 Tracking-Sensor, 426  
 Tragwerkskonzept, 656  
 Transfermodell, 68  
 Trendbüro, 310  
 Trennverfahren, 628, 689  
 Trimming, 364  
 Tylorismus, 11
- U**  
 Übungseffekt, 776  
 Übersetzungsmanagement, 104  
 Umformtechnik, 687  
 Umformverfahren, 632  
 Umweltmanagement, 171

- Unternehmensziel, 300  
Unterwerkzeug, 525  
Unwucht, thermische, 594  
Urform, 683  
Urheberrecht, 211  
Urmode, 68, 74
- V**  
Vakuumgießen, 70, 74  
Varianten-Stückliste, 852  
Variantenkonstruktion, 293  
Variantenmanagement, 792, 793  
Variantentreiber, 268  
VDA-Empfehlung, 115  
Verfahrensanweisung, 765  
Verfahrenstechnik, 247  
Verformung  
    abgestimmte, 545, 549  
    gleichgerichtete, 545  
Verhalten  
    labiles, 574  
    stabiles, 574  
    wärmestabiles, 575  
Verkäufermarkt, 124  
Verschleiß  
    abrasiver, 620  
    durch Oberflächenzerrüttung, 621  
    durch tribochemische Reaktion, 621  
Verschleiß, 620  
Verträglichkeitsmatrix, 802  
Viewing-Software, 447  
Virtual Reality, 55, 415, 425  
Visualisierung, 428  
Volumenmodell, 52, 420  
Vorkostenstelle, 129  
Vorspannkraft, 602  
Vorzugsteil, 788  
VRML-Datenformat, 55
- W**  
Wärmeausdehnung, 588, 590  
Wachsling, 73  
Wachsmodell, 74  
Wachstumsgesetz, 832  
Wandel, politische, 818  
Wartung, 728
- Web-Client, 106  
Wellenverformung, 549  
Werkstückgestaltung, 682  
Werkstoff, 349, 476  
    Kriechen, 598  
Werkstoffeigenschaften, 249  
Werkstoffkennwert, 138  
Werkstofftrennung, 732  
Werkstoffverhalten unter Temperatur, 598  
Werkstoffverträglichkeit, 732  
Werkstoffzuordnung, 655  
Werkzeug, 525  
Werkzeugbau, 83  
    generativer, 89  
    optimierter, 94  
Wertanalyse, 287  
Werfunktion, 384  
Wertprofil, 403  
Wertschöpfungskette, 124, 150, 195, 270, 819  
Wertungszahl, 392, 394  
Wettbewerb, unlauterer, 211  
Widerspruchsmatrix, 365  
Wiederholkonstruktion, 293  
Wiederverwertung, 730  
Wirkfläche, 480  
Wirkgeometrie, 375  
Wirkkonzept, 341, 347, 479  
Wirkprinzip, 249  
Wirkstruktur, 249  
Wissensmanagement, 103  
    integriertes, 780, 786  
Wissensspeicher, 786, 804  
Wissenstreppe nach North, 782  
Work Space, 444  
World Wide Web, 769
- Z**  
Zeitanalyse, 27  
Ziehkeilspannfutter, 521  
Zielkosten, s. auch Target Costing, 143  
Zielkostenindex, 145  
Zielkostenkontrolldiagramm, 146  
Zusammenarbeit, interdisziplinäre, 31  
Zuverlässigkeit, funktionale, 505  
Zwergmodellierung, 364