

VDI-Buch

Uwe Bracht
Dieter Geckler
Sigrid Wenzel

Digitale Fabrik

Methoden und Praxisbeispiele
Basis für Industrie 4.0

2. Auflage

VDI



Springer Vieweg

VDI-Buch

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/3482>

Uwe Bracht · Dieter Geckler · Sigrid Wenzel

Digitale Fabrik

Methoden und Praxisbeispiele

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

Uwe Bracht
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Sigrid Wenzel
Kassel, Deutschland

Dieter Geckler
Wolfsburg, Deutschland

VDI-Buch
ISBN 978-3-662-55782-2 ISBN 978-3-662-55783-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55783-9>

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 GmbH Deutschland 2011, 2018
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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Geleitwort 2. Auflage

Die Digitalisierung aller Geschäftsprozesse hat in diesem Jahrzehnt einen beispiellosen Aufschwung erfahren, der noch lange nicht beendet ist. Er wird getrieben durch die nach wie vor exponentiell wachsende Rechnerleistung, praktisch unbegrenzten Speicherplatz in der Cloud und stetig steigende Bandbreiten der Datenübertragung. Das Smartphone mit seinen Apps ist das Symbol der always-on-Mentalität und verändert zunehmend auch Abläufe und Verhalten in der Arbeitswelt. Die insgesamt dadurch möglichen neuartigen Geschäftsmodelle haben zunächst zum global angelegten Angriff junger Start-ups auf etablierte Branchen wie z.B. Handel, Fahrdienste, Reisebüros, die Unterhaltungsindustrie und andere Dienstleister geführt.

Aber auch die für Deutschland so wichtige produzierende Industrie wird jetzt unaufhaltsam von der Digitalisierungswelle erfasst und steht damit gänzlich neuen Herausforderungen bezüglich ihrer Geschäftsmodelle und -prozesse gegenüber. Selbst für KMU ist das Thema mittlerweile nicht mehr zu vernachlässigen. Die als vierte industrielle Revolution bezeichnete Initiative Industrie 4.0 ist zum Synonym für diese Bewegung geworden. In deren Mittelpunkt steht die digital vernetzte Wertschöpfung vom Produktentwurf über die Produktions- und Fabrikgestaltung bis hin zum Fabrikbetrieb. Als Rückgrat dieses Ansatzes gilt die Digitale Fabrik, deren fundamentale Bedeutung und Potenziale sich bereits in der ersten Auflage dieses Buches abzeichneten, jetzt aber viel konkreter hervortreten. Ergänzt um den bereits etablierten Ansatz der schlanken Produktion wird die Digitale Fabrik als Smart Factory zum neuen Paradigma der modernen Industrie.

Den Autoren aus Forschung und Industrie ist es aufbauend auf der ersten Buchauflage gelungen, diese bedeutende Evolution der Digitalen Fabrik in den wesentlichen Anwendungsfeldern methodisch und nachvollziehbar zu beschreiben, wobei der Anwendungsschwerpunkt in der auf diesem Gebiet führenden Automobilindustrie liegt. Aber auch der Anlagenbau, der Schiffbau und die Bauindustrie erleben eine ähnliche Entwicklung, die hier kurz und prägnant geschildert wird.

Insgesamt kann das Buch als wesentliches Referenzwerk zum Thema Digitale Fabrik gelten und stellt eine in diesem Detaillierungsgrad angemessene Beschreibung seiner wesentlichen Themenfelder aus Informatik,

Fabrikplanung und Einführungsorganisation dar. Besonders begrüßenswert sind die zahlreichen praktischen Beispiele aus den wesentlichen Anwendungsbereichen der Digitalen Fabrik sowie das ausführliche Literaturverzeichnis und das Glossar der vielen neuen Begriffe. Ich wünsche dem Buch weiterhin die verdiente Anerkennung und Verbreitung in Forschung, Lehre, Entwicklung und Industrie.

Hannover, November 2017

Prof. Dr.-Ing. Dr. mult. h.c. Hans-Peter Wiendahl

Vorwort 2. Auflage

Fabriken bilden mit ihrer industriellen Wertschöpfung nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Ebenso wie für die effiziente Entwicklung und Konstruktion marktgerechter Produkte wird auch für die Planung und den Betrieb von Fabriken eine intensive und umfassende Rechnerunterstützung immer notwendiger. Inzwischen steht sogar die digitale Transformation aller wesentlichen Unternehmensprozesse auf der Agenda.

Seit über einem Jahrzehnt hat sich für die durchgängige digitale Gestaltung von Produkten mit den dazu notwendigen Prozessen und Einrichtungen bis hin zur kompletten Fabrik der Begriff Digitale Fabrik etabliert. Das vorliegende Buch will hierzu einen grundlegenden Beitrag leisten und mit der zweiten, aktualisierten und erweiterten Auflage auch den Bezug zu den darauf aufbauenden Entwicklungen im Kontext von Industrie 4.0 aufzeigen.

Es richtet sich im thematischen Rahmen der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebs sowie der Produkt- und Prozessentwicklung gleichermaßen an betriebliche Entscheider, Planungs- und Betriebsingenieure, Wissenschaftler und an Studierende, die in diesen Gebieten tätig sind oder werden wollen.

Beginnend mit einem Rückblick auf die Entwicklung der Rechnerunterstützung für Geschäfts-, Planungs- und Produktionsprozesse in Unternehmen stellt das Buch zunächst unterschiedliche Definitionen der Digitalen Fabrik (DF – Digitale Fabrik) gegenüber und führt in den aktuellen branchenbezogenen Stand der Umsetzung ein. Für die weiteren Ausführungen stellt dann die inzwischen in Industrie und Forschung einheitlich verwendete Begriffsdefinition der VDI 4499 die Grundlage dar.

Um dem Leser ein frühes und kompaktes Grundsatzverständnis für das Konzept der DF zu vermitteln, werden im zweiten Kapitel die aus Sicht der Autoren relevanten Anwendungsfelder – von der Produktentwicklung bis zur Anlageninbetriebnahme – erläutert und anhand kleiner Beispiele vorgestellt.

Der Nutzen der DF wird im dritten Kapitel beschrieben. Es zeigt die Vorteile auf, die ein Unternehmen durch den intensiven Einsatz digitaler

Planungsmethoden gewinnt. Als Resultat der durchgängig angewendeten Methoden und Werkzeugen können Realisierungszeiten sowie Entwicklungs- und Herstellkosten bei gleichzeitig besseren und flexibleren Planungsergebnissen reduziert werden.

Entsprechend der Definition der DF widmet sich Kapitel 4 den Methoden und den mit ihr zu erstellenden Modellen, da diese die Basis der digitalen Planung und Betriebsführung darstellen. Ausgehend von einer Einordnung und begrifflichen Definition der jeweiligen Methodenklasse werden die Charakteristika und die Anwendungen der wichtigsten Methoden diskutiert. Ergänzt werden diese Beschreibungen um die Darstellung der notwendigen technischen Einrichtungen sowie moderner Interaktionsmedien. Die Fülle der Methoden lässt allerdings keine vertiefende Darstellung zu. Hier wird auf die jeweilige Fachliteratur verwiesen.

Da die digitalen Methoden in der Regel einzeln oder in Kombination in unterschiedlichen Softwarewerkzeugen implementiert sind, widmet sich Kapitel 5 den daraus resultierenden gängigen Werkzeugklassen. Die Nutzung der digitalen Methoden erfordert darüber hinaus ein durchgängiges Datenmanagement, um möglichst hohe Effektivität und Medienbruchfreiheit beim Einsatz zu gewährleisten. Möglichkeiten zur Realisierung geeigneter Systemarchitekturen und verschiedene Aspekte des Datenmanagements für die DF sind daher wichtige Betrachtungsgegenstände.

Organisatorische Aspekte der DF sind das Thema von Kapitel 6. Anhand von Beispielen wird aufgezeigt, wie die Methoden und Werkzeuge in einem Unternehmen eingeführt werden können und welche organisatorischen Veränderungen einen effektiven Betrieb der DF ermöglichen. Mit den neuen Werkzeugen ändern sich auch die Arbeitsabläufe der Planungen. Eine Darstellung der sich daraus ergebenden neuen Berufsbilder und Rollen schließt daher dieses Kapitel ab.

Kapitel 7 widmet sich umfassend dem praktischen Einsatz der DF und zeigt als Schwerpunkt am Beispiel Automobilindustrie, wie die DF in allen Gewerken und Planungsphasen erfolgreich eingesetzt werden kann. Neben der festen Einbindung in die Routineprozesse eines Konzerns wird am Beispiel der Einführung einer neuen Technologie auch die nutzbringende Verwendung bei innovativen Fragestellungen aufgezeigt. Es folgen Beispiele aus dem KMU-Bereich sowie aus dem Schiffbau und dem Anlagenbau. Der Einsatz mobiler, digitaler Endgeräte für die Fabrikplanung sowie die Zukunftsvision einer „Digital Lean-Factory 4.0“ schließen dieses Anwendungskapitel moderner digitaler Planungsmethoden ab.

Insgesamt ist das Buch so aufgebaut, dass die einzelnen Kapitel eine gewisse Eigenständigkeit besitzen und damit durchaus auch im Sinne eines Nachschlagewerkes genutzt werden können. Inhaltliche Überlappungen oder auch Wiederholungen sind durchaus gewollt und dienen der Lesbar-

keit. Definitionen sind aus dem Fließtext hervorgehoben und in einem Kasten dargestellt. Im ergänzenden Glossar sind die wichtigsten Begriffe des Buches nochmals zusammengestellt; das Sachverzeichnis erlaubt eine gezielte Suche nach Begriffen in den einzelnen Kapiteln.

Die Diskussionen im Fachausschuss „Digitale Fabrik“ in der Gesellschaft für Produktion und Logistik im Verein Deutscher Ingenieure (VDI-GPL) sowie in den zughörigen Richtlinienausschüssen haben sicherlich in erheblichem Maße zum Gelingen dieses Buches beigetragen. Der Dank der Autoren gilt insbesondere allen Institutionen und Unternehmen, die ergänzendes Bild- und Textmaterial zur Verfügung gestellt und für die Publikation freigegeben haben.

Für die intensive und kreative Unterstützung bei der Erstellung des Buches danken die Autoren Frau Dipl. Wirtschaftsing. Andrea Spillner und Herrn Dipl. Wirtschaftsing. Marco Seewaldt, wissenschaftliche Mitarbeiter am IMAB der TU Clausthal, mit ihren Teams.

In ganz besonderem Maße gilt der Dank der Autoren Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. mult. h.c. Hans-Peter Wiendahl für die kritische Durchsicht, die konstruktiven Hinweise und den umfassenden „Feinschliff“.

Clausthal, Wolfsburg und Kassel
im November 2017

*Uwe Bracht
Dieter Geckler
Sigrid Wenzel*

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort 2. Auflage.....	V
Vorwort 2. Auflage	VII
1 Einleitung, Definition und Stand der Umsetzung sowie der Bezug zu Industrie 4.0	1
1.1 Geschichtliche Entwicklung der Rechnerunterstützung	2
1.2 Definition der Digitalen Fabrik	9
1.2.1 Digitale Fabrik.....	9
1.2.2 Abgrenzung zu anderen Begriffen.....	12
1.3 Stand der branchenbezogenen Umsetzung	16
1.3.1 Automobilbau	16
1.3.2 Maschinen- und Anlagenbau	20
1.3.3 Schiffbau.....	22
1.3.4 KMU.....	24
1.4 Die Digitale Fabrik – eine grundlegende Basis für Industrie 4.0	24
2 Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik im Überblick.....	26
2.1 Fabrik-, Gebäude- und Ausrüstungsplanung	27
2.1.1 Fabrikplanung.....	28
2.1.2 Gebäudeplanung	32
2.1.3 Ausrüstungsplanung	33
2.2 Produktionsplanung.....	35
2.2.1 Planung von Fertigungsprozessen	37
2.2.2 Planung von Lackierprozessen	39
2.2.3 Planung von Montageprozessen	40
2.2.4 Produktionslayoutplanung	43
2.3 Logistikplanung.....	45
2.4 Produktions- und logistikgerechte Produktgestaltung.....	48
2.5 Anlagenanlauf und -betrieb	50
2.6 Die Digitale Fabrik als Basis der Industrie 4.0 - Produktion.....	52
3 Nutzen der Digitalen Fabrik.....	54
3.1 Nutzen für das Gesamtunternehmen.....	55
3.1.1 Marktvorteile durch schnellere Produkteinführung	55
3.1.2 Verbesserung der Produktqualität.....	59
3.1.3 Senkung der Produktionskosten	60
3.1.4 Verbesserung der Produktionsstätte.....	61
3.2 Nutzen für die Planung.....	62
3.2.1 Ganzheitliche Planung und neue Planungsprozesse	62

3.2.2	Verbesserung von Planungsschritten	64
3.2.3	Teilautomatisierung durch Assistenzsysteme und Workflowmanagementsysteme	66
3.2.4	Reduktion des Informationstransfераufwandes	69
3.2.5	Stabilisierung der Projektqualität	70
3.2.6	Bereitstellung von Planungsinformationen und -wissen.....	71
3.3	Nutzen für Anfertigung und Inbetriebnahme der Ressourcen	74
3.4	Nutzen im Betrieb	77
3.5	Quantitative Aussagen zum Nutzen	80
4	Methoden und Modelle in der Digitalen Fabrik	83
4.1	Die Begriffe Modell, Methode und Werkzeug	83
4.1.1	Der Modellbegriff.....	83
4.1.2	Methoden und Werkzeuge.....	85
4.2	Klassifikation der Methoden in der Digitalen Fabrik	87
4.3	Methoden der Informations- und Datenerhebung	88
4.3.1	Primärerhebung – Methoden der Befragung	90
4.3.2	Primärerhebung – Manuelle Beobachtung	91
4.3.3	Primärerhebung – Automatische Beobachtung	92
4.3.4	Sekundärerhebung – Dokumentenanalyse.....	98
4.4	Darstellungs- und Gestaltungsmethoden	99
4.4.1	Methoden zur Ablauf- und Prozessmodellierung	101
4.4.2	Methoden zur Informations- und Datenmodellierung	102
4.4.3	Methoden zur Zustandsmodellierung	104
4.4.4	Methoden zur Strukturmodellierung.....	105
4.5	Mathematische Planungs- und Analysemethoden.....	106
4.5.1	Methoden der mathematischen Optimierung.....	106
4.5.2	Graphentheoretische Methoden	109
4.5.3	Methoden der Statistik und Stochastik	110
4.5.4	Vergleichende quantitative Bewertungsmethoden	115
4.6	Simulationsmethoden	117
4.6.1	Kontinuierliche Simulation.....	118
4.6.2	Zeitgesteuerte (zeitdiskrete) Simulation	127
4.6.3	Ereignisdiskrete (Ablauf-)Simulation.....	128
4.7	Methoden der künstlichen Intelligenz	132
4.7.1	Multiagentensysteme MAS	132
4.7.2	Neuronale Netze	133
4.8	Visualisierungsmethoden	134
4.8.1	Visualisierung statischer grafischer Modelle.....	137
4.8.2	Dynamische Visualisierung.....	140
4.8.3	Virtual Reality (VR)	145
4.8.4	Augmented Reality (AR).....	146
4.9	Methoden der Kollaboration	150
4.9.1	Technische Kommunikationsmittel	152
4.9.2	Gemeinsame Informationsräume und Wissensmanagement .152	
4.9.3	Workflowmanagement und Workgroup Computing	154

4.9.4	Projektmanagement	156
4.10	Aspekte der Modellbildung und Modellnutzung	157
4.11	Technische Einrichtungen für die Digitale Fabrik.....	161
4.11.1	Einzelarbeitsplätze.....	162
4.11.2	Arbeitsplätze zur Kollaboration.....	163
4.11.3	Projektionstechniken	165
4.11.4	Interaktionsmedien	167
5	Datenmanagement und Softwarewerkzeugklassen	173
5.1	Das Datenmanagement in der Digitalen Fabrik.....	173
5.1.1	Begriffsdefinition und Abgrenzung	173
5.1.2	Anforderungen an das Datenmanagement aus Sicht der Digitalen Fabrik	177
5.2	Interoperabilität und Integrationsebenen	184
5.2.1	Begriffsdefinition.....	184
5.2.2	Festlegung eines allgemeinen Integrationsrahmens für die Digitale Fabrik.....	186
5.2.3	Beispiel eines Ordnungsrahmen zur Schaffung interoperabler Modelle und Systeme	188
5.3	Softwarewerkzeugklassen im Unternehmen.....	192
5.3.1	Werkzeugklassen der Produkt- und Produktionsmittelentwicklung	192
5.3.2	Werkzeugklassen in der Produktionsplanung.....	194
5.3.3	Werkzeugklassen zum Einsatz im Fabrikbetrieb	195
5.3.4	Steuerungssoftware zur Automatisierung von Produktionsanlagen	198
5.3.5	Softwarewerkzeugklassen für übergreifende Querschnittsaufgaben	198
5.4	Datenaustauschformate.....	200
5.4.1	Proprietäre herstellerspezifische Formate.....	202
5.4.2	De-facto-Standards	203
5.4.3	Neutrale, nicht standardisierte Datenformate	204
5.4.4	Neutrale standardisierte Datenaustauschformate	205
5.4.5	Branchenspezifische Entwicklungen	206
5.5	Metasprachen zum Datenaustausch.....	207
5.5.1	Die Metasprache XML	208
5.5.2	Standardisierungen auf XML-Basis.....	208
5.6	Technische Systemarchitekturen	209
5.6.1	Point-to-Point-Architektur.....	210
5.6.2	Hub&Spoke-Architektur.....	211
5.6.3	Bus-Architektur	212
5.7	IT-Lösungen zur technischen Werkzeugintegration.....	212
5.7.1	Filetransfer.....	213
5.7.2	Netzwerkprotokolle	213
5.7.3	Enterprise Application Integration.....	214
5.7.4	Service-orientierte Architektur	214

5.7.5	High Level Architecture	218
5.8	Integrative Lösungskonzepte.....	218
5.8.1	Produktpalette Dassault Systèmes	219
5.8.2	Digital Enterprise Suite von Siemens	222
5.8.3	Integrationsplattform der XPLM Solution GmbH.....	225
5.8.4	Virtuelle Inbetriebnahme.....	226
6	Organisation der Einführung und Nutzung.....	229
6.1	Allgemeine organisatorische Hinweise	229
6.1.1	Managemententscheidung	230
6.1.2	Anwenderakzeptanz	231
6.1.3	Ablauf- und Aufbaustruktur	231
6.1.4	Hardwareinfrastruktur	232
6.2	Einführung der Digitalen Fabrik	232
6.2.1	Einführungsphasen	233
6.2.2	Einführung der Digitalen Fabrik bei KMU	235
6.2.3	Einführung der Digitalen Fabrik in einen Konzern	236
6.3	Ein neuer organisatorischer Ansatz zur DF	246
6.3.1	Anforderungen an die neue Organisationsstruktur	246
6.3.2	Alternierendes Mehrstufiges Projektteam (AMP).....	247
6.3.3	Referenzmodell des Produktentstehungsprozesses.....	248
6.3.4	Grundmodell der neuen Organisationsstruktur.....	250
6.3.5	Embedded Planning.....	251
6.3.6	Anwendungsbeispiel des neuen Konzeptes	253
6.4	Neue Mitarbeiterrollen und -aufgaben	255
7	Anwendungen der Digitalen Fabrik	259
7.1	Industriebau.....	260
7.1.1	Building Information Modeling (BIM)	262
7.1.2	Die Modellierung der Fabrik	263
7.1.3	Ist-Aufnahme eines bestehenden Gebäudes	264
7.2	Planung der Gesamtfabrik	268
7.2.1	Fabriklayout.....	269
7.2.2	Fabrik-DMU	270
7.3	Planung der Logistik	274
7.3.1	Einsatz der Ablaufsimulation in der Logistikplanung	277
7.3.2	Auslegung der Betriebsmittel der Logistik	279
7.4	Ganzheitlicher Einsatz in der Automobilindustrie	281
7.4.1	Planung eines Presswerks.....	283
7.4.2	Planung eines Karosseriebaus	286
7.4.3	Planung der Lackiererei.....	290
7.4.4	Planung der Aggregatefertigung.....	295
7.4.5	Planung der Fahrzeugendmontage.....	297
7.4.6	Übergreifende Nutzung von Daten.....	302
7.4.7	Prozessoptimierungen und Änderungsmanagement	310
7.4.8	Einsatz von Projekt- und Wissensmanagement.....	313

7.4.9	Planung einer energieeffizienten Produktion.....	316
7.5	Einsatz der Digitalen Fabrik im Anlagenbau.....	324
7.6	Ganzheitliche Planung neuer Fertigungstechnologien	329
7.6.1	Einführung	329
7.6.2	Planung und Bewertung neuer Prozessketten beim Walzprofilieren.....	333
7.6.3	Ansatz und Vorgehensweise.....	335
7.6.4	Ergebnisse.....	339
7.7	Digitale Fabrik in KMU	340
7.7.1	Projektmanagement bei KMU	341
7.7.2	Einführung von 3D-CAD und Einsatz von VR in der Fabrikplanung.....	342
7.7.3	Erweiterte virtuelle Fabrikmodelle	351
7.8	Die Digitale Fabrik im Schiffbau	353
7.9	Digitale Fabrik in der Getränkeindustrie	354
7.10	Einsatz mobiler Endgeräte für die Fabrikplanung	358
7.10.1	Grundlagen	359
7.10.2	Mobile Anwendungen für die Digitale Fabrik.....	360
7.10.3	App-Entwicklungen zur Projektinformation, Datenaufnahme und Layoutabsicherung.....	361
7.10.4	Apps und Drohnen zur Kombination von Realität und Virtualität.....	365
7.11	Digital Lean Factory – eine Vision?.....	369
7.11.1	Grundlagen	369
7.11.2	Ist die Zukunft digital, lean und smart?	370
7.11.3	Fazit der Digital Lean Factory 4.0	373
8	Fazit und Ausblick.....	374
Literaturverzeichnis	377	
Glossar	415	
Abkürzungsverzeichnis	434	
Sachverzeichnis.....	439	

1 Einleitung, Definition und Stand der Umsetzung sowie der Bezug zu Industrie 4.0

Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen haben sich seit den 1990er Jahren wesentlich verändert und erfahren eine erneute Dynamisierung seit den 2010er Jahren. Alle Unternehmen bewegen sich heute in einem globalen, turbulenten Umfeld, in dem gravierende Marktereignisse auf Basis disruptiver Geschäftsmodelle immer schneller aufeinander folgen und zukünftige Entwicklungen schwerer zu prognostizieren sind. Insbesondere produzierende Unternehmen stehen vor der Herausforderung, geeignete Mittel zur Bewältigung der dadurch wesentlich häufiger anfallenden und zunehmend komplexeren Planungsaufgaben einzusetzen.

Der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt hat eine weiter fort schreitende Diversifizierung und Individualisierung von Produkten zur Folge, um Marktanteile halten zu können. In den meisten Branchen, wie beispielsweise in der Automobilindustrie, hat sich ein harter globaler Verdrängungswettbewerb etabliert. Produkte müssen in immer kürzerer Zeit entwickelt und bei gleichzeitig sinkenden Kosten und steigender Qualität auf den Markt gebracht werden (Bracht und Kappler 2011). Zur Differenzierung gegenüber den Wettbewerbern gilt es, stärker Nischen zu bedienen, womit sich zwangsläufig die Produktpalette im Unternehmen erweitert und die früher üblichen Skaleneffekte durch größere Stückzahlen entfallen.

Gerade der Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen und Methoden (Bracht 2008; vgl. auch Huber 2016) bietet in dieser Situation erfolgversprechende Ansatzpunkte zur Steigerung der Planungseffizienz und Realisierungsdauer von Produkten und Produktionseinrichtungen. Allerdings sind die mit deren Einsatz verbundenen Herausforderungen nur bedingt bekannt (vgl. auch Westkämper et al. 2013). Oftmals wird auch das umfassende Konzept der Digitalen Fabrik (DF) mit dem bereits seit Jahren gängigen Einsatz von rechnergestützten Planungsmethoden fälschlicherweise gleichgesetzt. Hier möchte das vorliegende Buch Aufklärungsarbeit leisten.

Dieses erste Kapitel gibt daher zunächst einen Rückblick auf die geschichtliche Entwicklung der Rechnerunterstützung für Geschäfts-, Pla-

nungs- und Produktionsprozesse in Unternehmen. Im Anschluss folgt eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Definitionen zur DF, eine abschließende Begriffsdefinition für dieses Buch und eine Abgrenzung des Begriffs zu ähnlichen in Wissenschaft und Industrie verwendeten Begriffen. Danach wird der branchenbezogene Stand der Umsetzung der DF näher beleuchtet. Abschließend wird der Bezug zu Industrie 4.0 hergestellt und gezeigt, dass die Entwicklungen von Industrie 4.0 bis hin zur Smart Factory auf der DF aufbauen.

1.1 Geschichtliche Entwicklung der Rechnerunterstützung

Ein bewährtes Mittel zur Lösung von Routineaufgaben in Unternehmen stellt die Rechnerunterstützung dar. Dies soll im Folgenden u. a. am Beispiel von Textverarbeitungssystemen und CAD-Systemen (CAD – Computer Aided Design) aufgezeigt werden.

Früher erforderte jede Korrektur eines Textes häufig ein komplett neues Schreiben des gesamten Dokumentes, bis in den 1970er und 1980er Jahren die Textverarbeitungssysteme in Form von PC-Lösungen ihren Siegeszug antraten und diese immensen Aufwände stark reduzierten. Eine Erweiterung der Funktionsumfänge, beispielsweise durch Seitenumbrochsfunktionen, Silbentrennung und Rechtschreibkorrektur, erleichterten die fortschreitende Gestaltung des Textes zunehmend. Diese Vorteile führten dazu, dass Textsysteme innerhalb weniger Jahre die Schreibmaschinen praktisch vollständig verdrängten.

Der Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Textsystemen fiel dabei schwer; der Nutzen durch die Zeitersparnis bei der Texterstellung sowie die bessere Qualität der Ergebnisse waren aber so offensichtlich, dass der Einsatz von Textsystemen nur in den ersten Anfangsjahren angezweifelt wurde.

Aus der Rückschau betrachtet wurden die schnelle Verbreitung der Systeme und die durchgreifenden Veränderungen, die die neue Technik brachte, selbst von den visionären Anwendern der 1970er Jahre nur teilweise erkannt. Mit den neuen Funktionen zur interaktiven Zusammenarbeit, zum Dokumenten-, Wissens- oder Workflowmanagement ist der ausgelöste Wandel nach lange nicht abgeschlossen.

Einen ersten groben Überblick über die breite Anwendung wesentlicher Systeme der Rechnerunterstützung beginnend mit den Textsystemen bis hin zum heutigen Trend der Realisierung von PLM-Systemen (PLM – Product Lifecycle Management) zeigt Abbildung 1.1. Diese Einordnung

gibt keine aufeinander aufbauenden Entwicklungsschritte wieder, sondern stellt die verschiedenen Systeme in einen groben zeitlichen Rahmen.

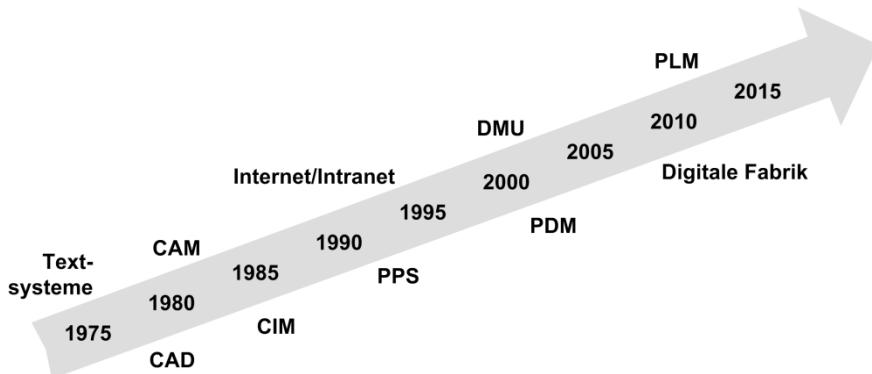


Abb. 1.1 Wesentliche Systeme der Rechnerunterstützung in breiterer Anwendung
(Die Abkürzungen werden im Glossar erläutert)

Ähnliche Vorteile, wie sie für Schreibkräfte durch Textsysteme entstanden, erlangten Konstrukteure in den 1980er Jahren durch CAD-Systeme. Allerdings sind die dort zu lösenden Aufgaben weitaus komplexer. Mit der Einführung dieser Systeme konnten Konstrukteure ihren Entwurf rechnergestützt gestalten, ändern, wiederverwenden und ergänzen, bis er den gewünschten Anforderungen entsprach. Zudem ermöglichten geometrische Funktionen – wie etwa eine Eingabehilfe, um eine Parallele zu zeichnen – eine wesentlich effizientere Arbeitsweise. Es war nun möglich, ein Produkt im Raum zu drehen, von verschiedenen Seiten zu betrachten oder einen Schnitt zu erzeugen. Allein die zuletzt genannte Aufgabe nimmt bei einer manuellen Bearbeitung sehr viel Zeit in Anspruch, da in diesem Falle jeder neue Schnitt eine neue Zeichnung erfordert. Durch die Unterstützung mit CAD-Systemen wurde die Konstruktionszeit für ein Produkt erheblich verkürzt.

Dennoch konnte man auch bei der Einführung von CAD-Systemen kaum auf belastbare Methoden zur Wirtschaftlichkeitsberechnung zurückgreifen, sondern musste den Nutzen abschätzen und sich stufenweise an einen sinnvollen Einsatz herantasten. Der Erfolg war aber auch hier so offensichtlich, dass heute eine manuelle Konstruktion am Zeichenbrett nicht mehr stattfindet.

Die Rechnerunterstützung für das Gebiet der Fabrikplanung entwickelte sich deutlich später und langsamer. Eine erste Grundlage für umfassende Anwendungen zur schnellen Generierung von Auswertungen, Kennzahlen und grafischen Analysen in Flächenplänen legte der Ansatz (Bracht 1984)

für ein EDV-gestütztes Werksstrukturdatenbank-System (EDV – Elektronische Datenverarbeitung) (Abb. 1.2).

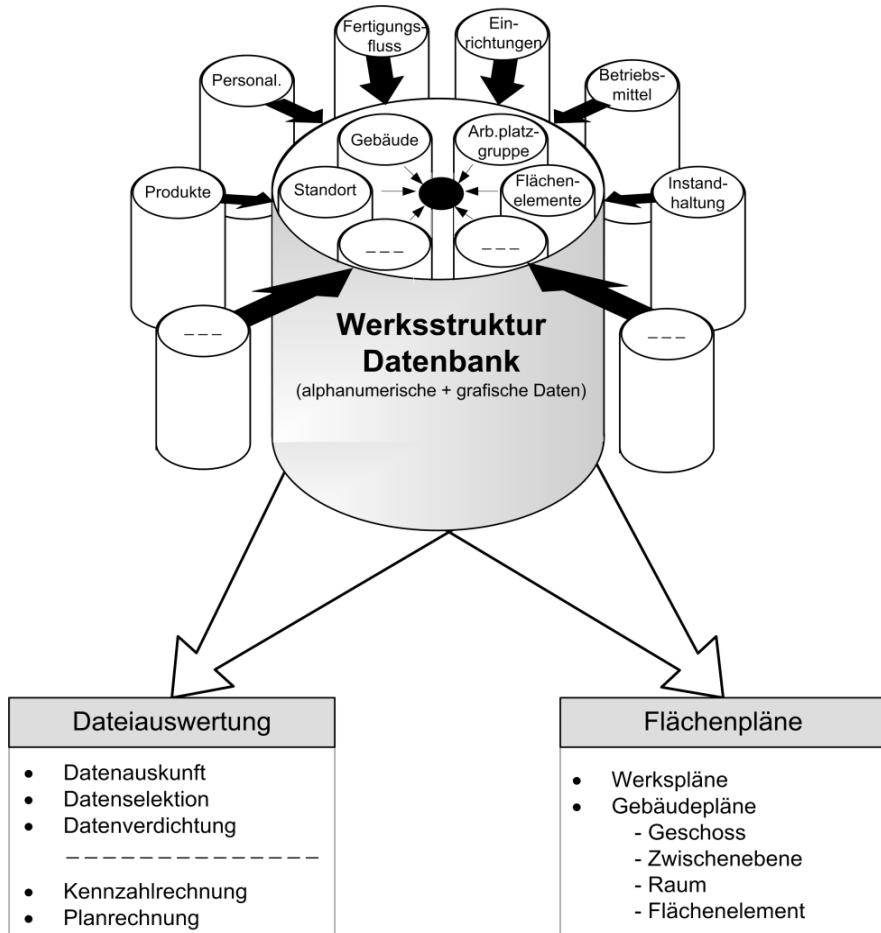


Abb. 1.2 Grundsätzliches Konzept einer Werksstrukturdatenbank (Bracht 1984)

In den späten 1980er Jahren war es dann insbesondere die Automobilindustrie, die eine CAD-gestützte Fabrikplanung – z. B. bei der VW AG das System HLS (HLS – Hallenlayoutsystem) und bei der Daimler Benz AG das System FAPLIS (FAPLIS – Fabrikplanungs- und Informationssystem) – umfassend einföhrte.

So konnte z. B. mit FAPLIS ein grundsätzlicher Schritt in Richtung einer rechnerunterstützten Fabrikplanung getan und eine einheitliche Datenbasis für viele Planungstätigkeiten geschaffen werden (Abb. 1.3).



Abb. 1.3 Softwarestruktur des Fabrikplanungs- und Informationssystems FAPLIS (Faber und Bracht 1988)

Diese damals konzipierte und implementierte Softwarestruktur eines CAD-Systems zur Fabrikplanung besteht im Wesentlichen bis heute.

Aufgrund des stetigen Fortschritts in der IT (IT – Informationstechnik), der damit verbundenen Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Rechnersystemen sowie des begrenzten Potenzials der bisherigen Systeme durch deren Einsatz z. B. in „isolierten“ Fertigungsbereichen, entstand die Idee, die vielen Softwarelösungen mit ihrem vorwiegenden Inselcharakter in Netzwerken zu bündeln und datentechnisch zu verbinden. Dieses seit den 1980er Jahren verfolgte Konzept unter dem Begriff *Computer Integrated Manufacturing* (CIM – Computer Integrated Manufacturing) hatte das Ziel, eine durchgängige digitale Informationsverknüpfung von der Konstruktion bis in die Produktion sicher zu stellen.

CIM wurde allgemein als eine Produktion verstanden, deren Einrichtungen automatisiert und flexibel zugleich sein sollten. Mit CIM besteht die Möglichkeit, eine bessere Kundenorientierung und Reaktionsschnelligkeit auch für kleine Serien bei niedrigen Beständen zu erreichen. Den Integra-

tionsgedanken des CIM-Modells nach Scheer zeigt die Abbildung 1.4. Das Modell sieht vor, schon während der Planung sowohl betriebswirtschaftliche Funktionen aus der Produktionsplanung und -steuerung (PPS – Produktionsplanung und -steuerung) als auch die technische Funktionen aus dem CAD-/CAM-Bereich (CAM – Computer Aided Manufacturing miteinander zu verbinden.

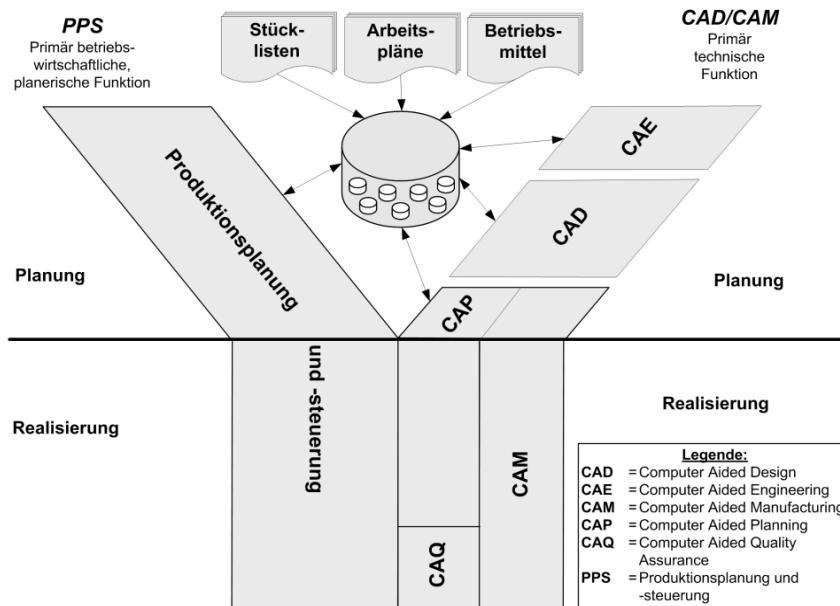


Abb. 1.4 Das Y-CIM-Modell (Scheer 1990, S. 2)

Der CIM-Ansatz wurde 1985 vom Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung (AWF) folgendermaßen definiert:

„CIM beschreibt den integrierten EDV-Einsatz in allen mit der Produktion zusammenhängenden Betriebsbereichen. Es umfasst das informationstechnische Zusammenwirken zwischen CAD, CAP, CAM, CAQ und PPS. Hierbei soll die Integration der technischen und organisatorischen Funktionen zur Produkterstellung erreicht werden. Dies bedingt die gemeinsame Nutzung einer Datenbasis.“ (AWF 1985, S. 10)

Die Einführung und möglichst breite Umsetzung von CIM in der Praxis war jedoch mit diversen Problemen verbunden. Rückblickend betrachtet finden sich vielfältige Gründe technologischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Ursprungs, die eine komplette Umsetzung verhinderten.

Ein wesentlicher Schwachpunkt des Konzepts lag sicherlich in dem Bestreben einer vollautomatisierten Fertigung; die menschenleere Fabrik war das Ziel vieler Ingenieure. Die Komplexität der Aufgabenstellungen wurde jedoch unterschätzt. Laufende Produkt- und Prozessänderungen erwiesen sich in der Praxis als große Probleme und verhinderten den rein automatischen Ablauf. Beispielsweise hat der Volkswagen mit der „Halle 54“ die technische Machbarkeit der fast vollautomatischen Endmontage eines Golf II bewiesen, jedoch standen der Aufwand zum Bau, Betrieb und zur Instandhaltung dieser Anlage in keinem Verhältnis zu ihrem Nutzen (Ophey 2005; Schlott 2006).

Das Problem der unzureichenden Wirtschaftlichkeit der CIM-Systeme stellte sich in der Praxis schnell heraus. Einerseits wurden beispielsweise die Schnittstellenproblematiken zwischen den verschiedenen Softwaretools und Programmiersprachen unterschätzt (Eckert und Masurat 2005), andererseits wurden der nichtmonetäre Nutzen und die Synergieeffekte zu optimistisch bewertet. Hochautomatisierte Fertigungslien waren zudem sehr unflexibel, was bei der Umstellung der Produktionseinrichtungen auf ein neues Produkt zu immensen Kosten und langen Hochlaufzeiten führte. Besonders machte auch die zunehmende Variantenvielfalt eine vollautomatisierte Massenproduktion in vielen Bereichen unrentabel. Zudem wurde der Mensch als wichtiger – nicht zuletzt improvisierender – Faktor vernachlässigt, da der Umsetzungsschwerpunkt des CIM-Konzepts eindeutig auf der IT lag.

In der Folge entstanden andere Produktionskonzepte, wie das Lean Manufacturing, das durch die konsequente Vermeidung von Verschwendungen sowie sinnvolle Nutzung der menschlichen Kreativität und Anpassungsfähigkeit flexibler ist und damit häufig als wirtschaftlicher bezeichnet wird (Oeltjenbruns 2000).

Eine pauschale Aussage, CIM sei gescheitert, ist jedoch nicht gerechtfertigt. Aus dieser Zeit stammen unterschiedliche Automatisierungsansätze und rechnergestützte Methoden der Fertigungsplanung, die z. B. auch in die aktuellen Entwicklungen zur DF eingeflossen sind.

Aufgrund der stetig zunehmenden Leistungsfähigkeit von Rechnersystemen haben sich die Konstruktions- und Planungsprozesse in Unternehmen im Laufe der letzten Jahrzehnte grundlegend gewandelt (Abb. 1.5).

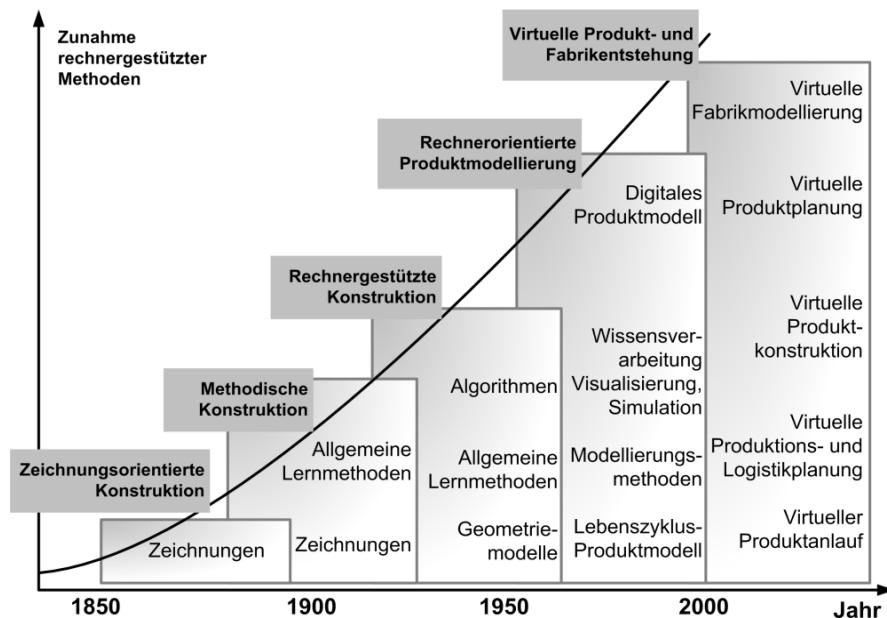


Abb. 1.5 Evolutionsphasen der Produktentwicklung (Spur 2001c, S. 11)

Von einer zeichnungsorientierten Konstruktion verlief die Entwicklung bis zur heutigen virtuellen Produkt- und Produktionsentstehung. Im Bereich der Produktplanung entsteht durch die Nutzung integrierter Rechnergemeinschaften ein digitales Produktmodell. Dazu stehen verschiedene Werkzeuge der Simulation, Visualisierung und Wissensverarbeitung zur Verfügung. Der Planer erfährt während des heutigen Entwicklungsprozesses durch diese modernen Werkzeuge bei der Lösungsfund und Absicherung eine wesentliche Unterstützung.

Das digitale Produktmodell wird heute immer häufiger und umfassender in seiner Änderungsgeschichte und Variantenvielfalt mit einem PDM-System (PDM – Product Data Management) dokumentiert und verwaltet. Aktuelle Entwicklungen verknüpfen die Produktionsprozesse und die dafür benötigten Ressourcen der DF mit den PDM-Daten und stellen so sicher, dass die richtigen Datenstände der verschiedenen Modellversionen konsistent miteinander verknüpft werden. Der weitere Ausbau führt zum PLM-System. Mit diesem wird der gesamte Lebenszyklus des Produktes in allen Aspekten der Produktpflege und Produktion abgebildet.

Einen umfassenden Literaturüberblick zu Entwicklung, Stand und Perspektiven der Digitalen Fabrik gibt Spillner (2012).

1.2 Definition der Digitalen Fabrik

In der Literatur finden sich unterschiedlicher Definitionen des Begriffs „Digitale Fabrik“. Diese hatten ein unterschiedliches Verständnis von Inhalten der DF vor allem in der Praxis zur Folge. Die Festlegung und breite Verwendung einer anerkannten Definition ist daher von großem Interesse, um den gewachsenen Missverständnissen entgegenzuwirken und ein einheitliches Begriffsverständnis zu schaffen.

1.2.1 Digitale Fabrik

Das Kapitel stellt zunächst einige Ansätze aus der gängigen Literatur sowie die im Jahre 2008 branchenübergreifend verabschiedete Definition aus der Richtlinie VDI 4499 vor. Die Auflistung der Definitionen erfolgt chronologisch in der Reihenfolge ihrer Publikation (siehe auch Abb. 1.6). Auf eine vollständige Darstellung aller Definitionen wird kein Anspruch erhoben.

Bley und Franke (2001) sehen die Verknüpfung von Simulationstechnologien in der Produktionsplanung über die verschiedenen Unternehmensebenen als Rahmen der DF an, welche durch gemeinsame Datennutzung Synergieeffekte zwischen den einzelnen Anwendungsbereichen entstehen lässt.

Dombrowski et al. (2001) definieren die DF als rechnerunterstützte Abbildung aller Gestaltungsmerkmale und Prozesse der Fabrik und als virtuell zu betreibendes Modell unter Verwendung realer Daten oder Planungsdaten. Die Abbildung umfasst neben den Kerngeschäftsprozessen auch alle Querschnittsfunktionen und insbesondere die baulichen, technischen und organisatorischen Ressourcen. Hierunter sind u. a. die bauliche Infrastruktur (z. B. Gebäudeflächen der Fertigung), die technische Infrastruktur (z. B. IT-Systeme und -Infrastruktur) sowie die gesamte Aufbau- und Ablauforganisation zu verstehen.

Für Bracht (2002a) liegt das Hauptanwendungsbereich der DF auf der visuellen und simulativen Abbildung der Produktion zukünftiger Produkte. Durch eine ganzheitliche Betrachtung des Entstehungsprozesses sollen Fehler schon während der Planung erkannt werden. Die DF stellt das Bindeglied zwischen Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion dar.

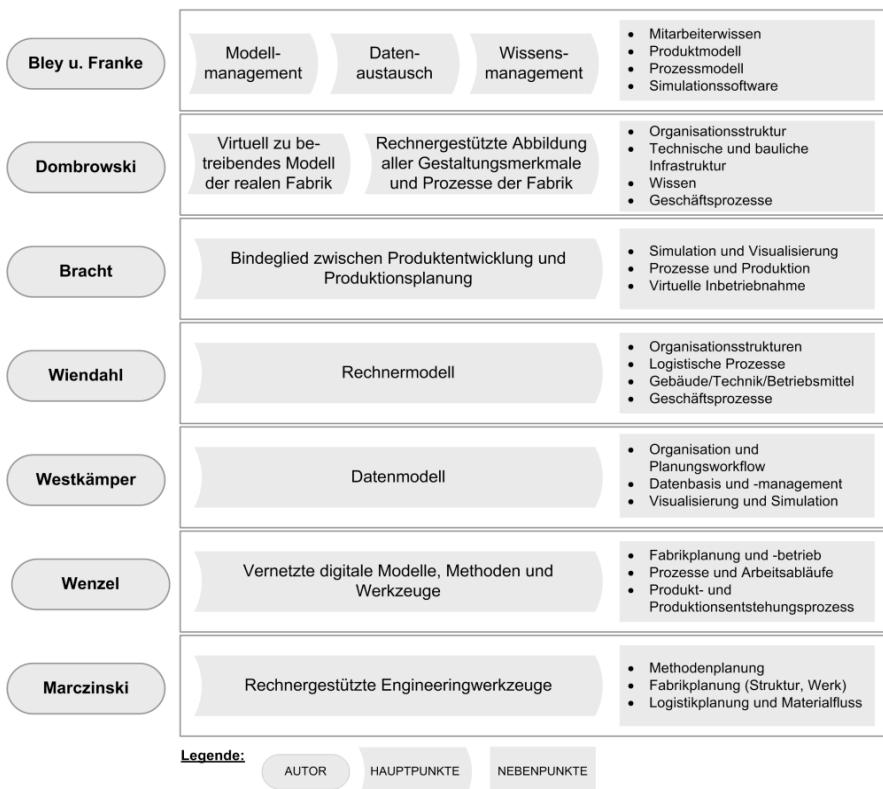


Abb. 1.6 Zentrale Elemente im Zusammenhang mit dem Begriff Digitale Fabrik bei wesentlichen Autoren

Wiendahl (2002b) sieht die DF als Abbildung sämtlicher Elemente und Prozesse einer Fabrik in einem Rechnermodell. Zur nachvollziehbaren Darstellung der großen Datenmengen für den Menschen ist dabei das Werkzeug Virtual Reality (VR – Virtual Reality) von besonderem Nutzen.

Westkämper et al. (2003) verstehen die DF als Abbild der realen Fabrik in einem digitalen Modell, welches die Strukturen und Fertigungsprozesse visualisiert, simuliert und somit erlebbar macht. Softwarewerkzeuge leisten diese Visualisierung und Simulation, wobei ein Datenmodell das Bindeglied zwischen den verschiedenen Werkzeugen darstellt.

Wenzel et al. (2003) verstehen unter dem Begriff der DF die Gesamtheit aller Methoden und Werkzeuge zur durchgängigen Unterstützung von Fabrikplanung und -betrieb unter Einbeziehung der zugehörigen Prozesse und Arbeitsabläufe auf der Basis vernetzter digitaler Modelle. Die Autoren verstehen unter der DF zum einen die Vernetzung der Werkzeuge und

Modelle und zum anderen die Abbildung sowohl der statischen als auch dynamischen Eigenschaften aller betroffenen Elemente. Mit dieser Definition bezieht Wenzel (2006) zum einen die Aufgaben und Vorgänge innerhalb des betrachteten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses (Arbeitsabläufe der MitarbeiterInnen) und zum anderen die Planungs- und Betriebsunterstützung (Nutzung von Modellen während der Planung und im späteren Anlagenbetrieb) explizit mit ein. „Hauptaufgabe ist die Integration von Methoden und Werkzeugen, nicht die Ausgestaltung von Teilthemen (z. B. Simulation). Dabei sind auch die bereits im Unternehmen installierten Softwarewerkzeuge zu berücksichtigen.“ (Wenzel 2006)

Für Marczinski (2006) sind unter dem Begriff „Digitale Fabrik“ vor allem die rechnergestützten Engineering-Werkzeuge im Rahmen des Produktentstehungsprozesses zu verstehen. Seine Aussagen gehen dabei mit einer Befragung aus dem Jahre 2006 unter OEM (Original Equipment Manufacturer), Zulieferern und Ausrütern konform. Diese ergab, dass ein Großteil der befragten Unternehmen unter dem Begriff vor allem Softwarewerkzeuge verstand, wobei der Integrationsaspekt jeweils stark betont wurde.

Um den unterschiedlichen Interpretationen des Begriffs Einhalt zu gebieten und dem vielversprechenden Ansatz einen allgemeinen Durchbruch zu verschaffen, wurde auf Anregung führender Vertreter aus Wissenschaft und Praxis der VDI-Fachausschuss „Digitale Fabrik“ gegründet. Die erste Sitzung fand im Jahr 2002 an der TU Clausthal statt.

Der Begriff „Digitale Fabrik“ wird in der von diesem Ausschuss in den folgenden Jahren unter Leitung von Prof. Bracht erarbeiteten Richtlinie VDI 4499 wie folgt definiert:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.“

Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ (VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 3)

Mit dieser Definition werden erstmalig und branchenübergreifend die in der Fachwelt diskutierten Auffassungen zusammengeführt und vereinheitlicht. Dabei ist sie umfassend genug und lässt genügend Freiheit in der Gestaltung der konkreten Umsetzung. Die Richtlinie gibt klar wieder, dass es sich entgegen einer verbreiteten Auffassung bei der DF nicht um ein reines

Softwarethema handelt. Ebenso wichtig sind die eingesetzten und miteinander abgestimmten Methoden und Prozesse (Bracht 2008).

Der Hauptfokus der DF liegt auf den Bereichen Produktionsplanung und Gestaltung der Fabrik, wie die Abbildung 1.7 verdeutlicht.

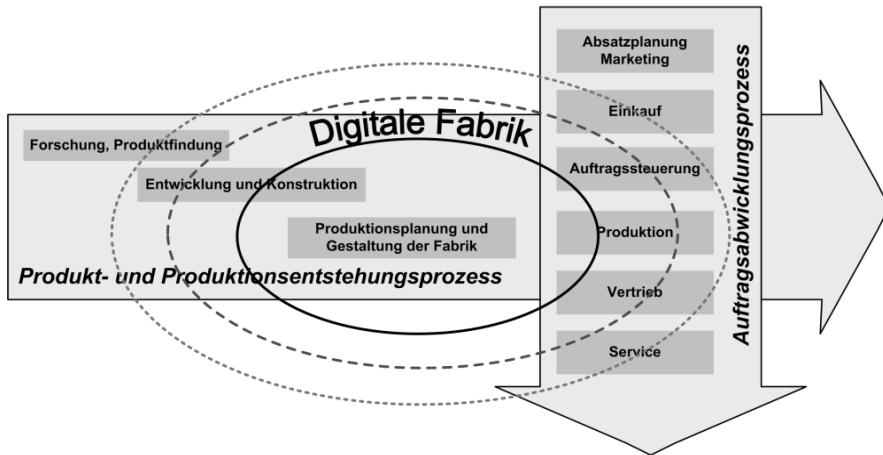


Abb. 1.7 Fokus der Digitalen Fabrik im Spannungsfeld der Unternehmensprozesse (VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 3)

Damit ist es möglich, sowohl die Belange der Entwicklung und Konstruktion als auch die Forderungen aus dem operativen Betrieb von Anfang an und stärker als bisher, in das Konzept zu integrieren. Durch den Einsatz mobiler Endgeräte und Augmented Reality (AR – Augmented Reality) werden insbesondere für den Bereich der Umplanungen neue Perspektiven aufgezeigt (vgl. Bracht und Brosch 2013c).

1.2.2 Abgrenzung zu anderen Begriffen

Neben dem Begriff der DF existieren in der Literatur weitere Bezeichnungen, die im vorliegenden Zusammenhang genannt oder in missverständlicher Weise sogar synonym verwendet werden. Zur Einordnung der DF in eine Gesamtsystematik sollen daher einige dieser Begriffe im Folgenden klärend erläutert werden.

- **BIM**

BIM (Building Information Modeling, deutsch: Gebäudedatenmodellierung) ist eine Methode der optimierten Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden auf der Basis von Software und einem um-

fassenden Datenmodell. Dabei werden alle relevanten Gebäudedaten digital erfasst und vernetzt. Das Gebäude wird als virtuelles Gebäudemodell auch geometrisch erfasst und kann visualisiert werden. BIM wird sowohl im Bauwesen zur Bauplanung und Bauausführung als auch im Facilitymanagement zur Bewirtschaftung der Gebäude angewendet (Egger et al. 2013) (siehe auch Abschnitt 7.1.1).

- **Digitale Produktionsplanung**

Digitale Produktionsplanung bezeichnet die Rechnerunterstützung der Produktionsplanung zur schnellen Umsetzung von Produktdaten in Prozessdaten zur materiellen Erzeugung des Produktes. Ein wesentlicher Bestandteil stellt die Vernetzung von prozess- und produktorientierten Modellen zu einem integrierten Produktionsmodell dar. Neben der Beschleunigung der Planung ist die optimale Gestaltung der Produktionsprozesse durch methodische Vorgehensweisen unter besonderer Berücksichtigung der Kriterien Qualität und Kosten ein wichtiges Ziel. Die digitale Produktionsplanung dient der Planung der Produktionsprozesse und stellt somit einen Teilaspekt der DF dar.

- **Digitaler Fabrikbetrieb**

Nach VDI 4499 Blatt 2 (2011, S. 5-6) unterstützt der digitale Fabrikbetrieb die „Nutzung von Methoden, Modellen und Werkzeugen der DF, die bei der Inbetriebnahme einzelner Anlagen, dem Anlauf mehrerer Anlagen und der Durchführung realer Produktionsprozesse eingesetzt werden. Ziele sind die Absicherung und Verkürzung des Anlaufs sowie die betriebsbegleitende und kontinuierliche Verbesserung der Serienproduktion.“ Die virtuelle Inbetriebnahme stellt hierbei den ersten Schritt (Sauer et al. 2010) zum Digitalen Fabrikbetrieb dar.

- **Digitaler Schatten**

Der Digitale Schatten als ein Handlungsfeld von Industrie 4.0 ist das „hinreichend genaue“ Abbild der Prozesse „in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten“ zu schaffen. Im Einzelnen gehört dazu die Beschreibung der notwendigen Datenformate, der Datenauswahl und der Datengranularitätsstufe (Bauernhansl et al. 2016, S. 23).

- **Digitaler Zwilling**

Neben dem Begriff des Digitalen Schattens ist der Begriff des Digitalen Zwilling verbreitet. Der Digitale Schatten überführt zunächst den realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt. Der Digitale Zwilling kann darauf aufbauend durch ein Prozessmodell und Simulation ein möglichst identisches Abbild der Realität liefern (Bauernhansl et al. 2016, S. 23).

- **Digitales Produkt**

Das Konzept des digitalen Produktes zielt auf eine optimale Nutzung und Pflege von Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus ab und erfordert hierzu eine definierte, konsistente Datenbasis. Dabei sollen alle Daten (z. B. aus einem CAD-Werkzeug), die ein Produkt möglichst realitätsnah beschreiben und von den Unternehmensprozessen genutzt werden, in dedizierten Datenbanken mit festgelegter Datenheit abgelegt und miteinander verknüpft werden. Somit können insbesondere nachgelagerte Unternehmensprozesse aus diesen Informationen einen Nutzen ziehen. Ziel ist die optimale Nutzung und Pflege von Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus (Bongiulmi et al. 2003).

- **DMU**

Als Digital Mock-Up (DMU – Digital Mock-Up) wird die Repräsentation eines realen Produkts in einem digitalen Modell bezeichnet (Döllner und Kellner 2000). Dieses Modell setzt sich aus Einzelteilen und Produktgruppen (geometrische Informationen), Funktionen sowie produktions-technischen Informationen zusammen. Mit der zusätzlichen Angabe der Fertigungsfolge lässt sich für jeden Fertigungsschritt der aktuelle Bauzustand des Produktes abbilden.

- **Fabrik-DMU**

Das Ziel des Fabrik-DMU ist die ganzheitliche Beschreibung der Fabrik schon ab der Konzeptplanung. Dabei werden das Gebäude, seine Einrichtungen sowie die geplanten Fertigungsanlagen aller Gewerke in einem 3D-Gesamtmodell zusammengeführt. Anhand dieses Modells können frühzeitig gewerkeübergreifende Lösungen gefunden, Kollisionen und Fehler vermieden sowie letztendlich ein Gesamtoptimum abgesichert werden.

- **Industrie 4.0**

„Industrie 4.0 ist ein Metabegriff für die Weiterentwicklung der Produktions- und Wertschöpfungssysteme durch die Verknüpfung der realen und der digitalen Welt. Diese Verknüpfung entsteht durch sich selbststeuernde Cyberphysische Systeme (CPS – Cyberphysische Systeme), die mit eingebetteten Systemen (Embedded Systems) ausgestattet sind. Industrie 4.0 beschreibt die vertikale (innerhalb eines Unternehmens) und die horizontale Verknüpfung dieser CPS (sowohl über mehrere Unternehmensbereiche als auch über mehrere Unternehmen entlang der Supply Chain hinweg) zur effizienten, dezentral organisierten und flexiblen Produktion von Erzeugnissen oder Durchführung von Dienstleistungen“ (BMW i 2015, S. 7).

- Smart Factory

Ein wichtiges Element von Industrie 4.0 ist die intelligente Fabrik (Smart Factory). Die Smart Factory beherrscht durch die umfassende Vernetzung und die Nutzung des Internets der Dinge Komplexität, ist weniger störanfällig und steigert die Effizienz in der Produktion. In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen so selbstverständlich wie in einem sozialen Netzwerk (acatech und Forschungsumon Wirtschaft und Wissenschaft 2013).

- Virtuelle Inbetriebnahme

Für einen reibungslosen Übergang von der Fabrikplanung zum Fabrikbetrieb ist durch effizienten Aufbau und schnelle Inbetriebnahme der entsprechenden Anlagen Sorge zu tragen. Die virtuelle Inbetriebnahme einer Produktionsanlage bezeichnet die zeitliche Vorwegnahme der realen Inbetriebnahme am Rechner. Während der virtuellen Inbetriebnahme können – je nach Fortschritt der Inbetriebnahmephase – virtuelle und reale System- und Steuerungskomponenten miteinander gekoppelt sein (VDI 4499 Blatt 2 2011).

- Virtuelle Produktion

Der Begriff Virtuelle Produktion bezeichnet eine durchgängige Planung, Evaluierung und Steuerung von Produktionsprozessen sowie -anlagen mithilfe digitaler Modelle. Deren Ziel ist die vollständige Abbildung des Produktes und der Produktion in einem experimentierfähigen Modell über den gesamten Lebenszyklus des Produktes und Produktionssystems (Spur 2001c; Reinhart et al. 1999; Zäh und Müller 2004).

In Abgrenzung zur Produktion versteht Reinhart die DF als die Gesamtheit der Mitarbeiter/-innen, Softwarewerkzeuge und Prozesse zur Erstellung der virtuellen Produktion. Sie stellt mit den entsprechenden Methoden und Werkzeugen das Bindeglied zwischen virtueller und realer Produktion dar (Reinhart et al. 1999).

- Virtuelles Unternehmen

Unter einem Virtuellen Unternehmen ist ein temporärer Zusammenschluss von rechtlich und wirtschaftlich unabhängigen Unternehmen, Institutionen und/oder Einzelpersonen zu verstehen. Diese Kooperation dient dem Zwecke der gemeinsamen Leistungserbringung zur Realisierung von Wettbewerbsvorteilen und Nutzung neuer Marktchancen durch einen gemeinsamen Marktauftritt (Hansmann und Ringle 2005; Mertens et al. 1998).

Der Ausdruck virtuell ist hier im Sinne von scheinbar zu verstehen. Die Produkte eines Virtuellen Unternehmens werden von den am Zusammenschluss beteiligten Unternehmen hergestellt. Für die Kunden bedeutet dies eine Reduktion der Lieferantenanzahl, da der Vertrieb über ei-

nen gemeinsamen Kanal erfolgt. Die Unternehmen im Virtuellen Unternehmen profitieren von den Skaleneffekten eines gemeinsamen Marktauftritts sowie der größeren Attraktivität ihrer Produkte durch die größere Produktpalette.

1.3 Stand der branchenbezogenen Umsetzung

Neben den bisher vorliegenden verschiedenen Begriffsdefinitionen zur DF gab und gibt es ebenfalls unterschiedliche Auffassungen zum Umsetzungsstand. Während einige Autoren die DF bereits vor Jahren in einer intensiven Projektumsetzung sahen (Dowidat 2002; Geckler und Rehnelt 2004), ist sie für andere noch eine Zukunftsvision, die allerdings weit über derzeit diskutierte Konzepte hinausgeht (Brandt 2005).

Der tatsächliche Umsetzungsstand differiert zwischen den einzelnen Branchen sehr stark, was im Wesentlichen auf unterschiedliche Rahmenbedingungen zurückzuführen ist (Bracht 2012).

Während bei Automobilherstellern und -zulieferern schon länger vielfältige Instrumente und Methoden der DF eingeführt und etabliert sind, steht manchen – insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU – kleine und mittlere Unternehmen) – noch die grundsätzliche Beschäftigung mit dieser Thematik bevor. Zurzeit hat wohl kaum ein mittelständisches Unternehmen die DF wirklich umfassend eingeführt. Ehrgeizige Ziele, die Umsetzung innerhalb von wenigen Jahren zu realisieren, konnten nicht erreicht werden.

1.3.1 Automobilbau

Bei der Umsetzung der DF in die Praxis nimmt die Automobilindustrie neben der Luft- und Raumfahrtindustrie eine Vorreiterrolle ein. Die Entscheidung zur Einführung der DF ist bereits bei allen großen Herstellern getroffen worden. Die damit verbundenen Potenziale (Walter 2002) werden offenbar von dem verantwortlichen Management als sehr hoch eingeschätzt.

Die bisher erreichten Vorteile zeigen sich beispielsweise aus Sicht der Daimler AG (Eißrich 2007) in der Effizienzsteigerung der Planung und Produktion, in einer Erhöhung der Auslastung der Werke, in der Vermeidung von Änderungskosten im Anlauf sowie durch eine höhere Planungsgüte bedingt durch frühzeitig abgesicherte Entwicklungsstände. Weiter verfolgte Ansätze bei der Einführung der DF sind die Optimierung der

Planungsprozesse, die frühzeitige Absicherung der Planungsumfänge, eine gewerkeübergreifende Integration von Entwicklung und Produktion sowie die Sicherstellung der Datendurchgängigkeit vgl. auch Engel et al. (2010).

Auch bei der Audi AG wurde festgestellt, dass sich die Investitionen insbesondere durch die Reduzierung der „Time-to-Market“, durch eine gesteigerte Qualität und durch eine Kostenreduktion auszahlen (Forster 2007). Das neue Audi-Werk in Mexiko konnte inzwischen komplett virtuell geplant in Betrieb genommen werden (Köth und Günnel 2016).

Jedoch existieren noch immer ungelöste Probleme, die eine komplette Einführung bis jetzt behindern. Hierbei ist die Integration älterer Softwarewerkzeuge von zentraler Bedeutung, um eine Durchgängigkeit der Planung zu gewährleisten.

Das Ziel einer durchgängigen Prozesskette zwischen Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion mit einem ständigen Abgleich zwischen digitaler und realer Fabrik bei allen Beteiligten soll wesentliche Nutzenpotenziale erschließen. Diese werden bei der Daimler AG mit nachweisbaren Piloterfolgen in einer gesteigerten Flexibilität, beschleunigten Abläufen und einer verbesserten Entscheidungsqualität gesehen (Bär 2004).

Die Ziele der DF liegen bei der Volkswagen AG in der Senkung der Fertigungs-, Gemein-, Investitions- und Anlaufkosten sowie in einer Verbesserung der Qualität und einer Verkürzung der Fertigungszeiten (Geckeler 2008).

Das frühe Konzept der DF soll beispielhaft an der Systemlandschaft der BMW AG erläutert werden. Ende der 1990er Jahre bestand die digitale Welt bei BMW hauptsächlich aus Insellösungen, die einzelne Teilprozesse der Produktionsplanung bestmöglich unterstützten. Zwischen diesen Systemen gab es Schnittstellen, welche aber nur bestimmte Systeme miteinander verbanden. Somit konnten Daten während der einzelnen Planungsphasen zwar teilweise weiterverwendet werden, jedoch war nicht sichergestellt, dass jeder Planungsbereich mit dem aktuellen Planungsstand arbeitete. Diese digitale Landschaft bei BMW hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Neben der Einführung weiterer bisher nicht digital unterstützter Planungen wurden zusätzliche Instrumente implementiert, während eine stetige Weiterentwicklung dieser Instrumente in anderen Bereichen stattfand (Reiter 2004b). Zudem wurden neue Schnittstellen zwischen den Systemen geschaffen und die Durchdringung konnte erhöht werden. Ziel ist die durchgängige Vernetzung aller Planungsprozesse sowie die Standardisierung von Planungsobjekten und -prozessen (Abb. 1.8).

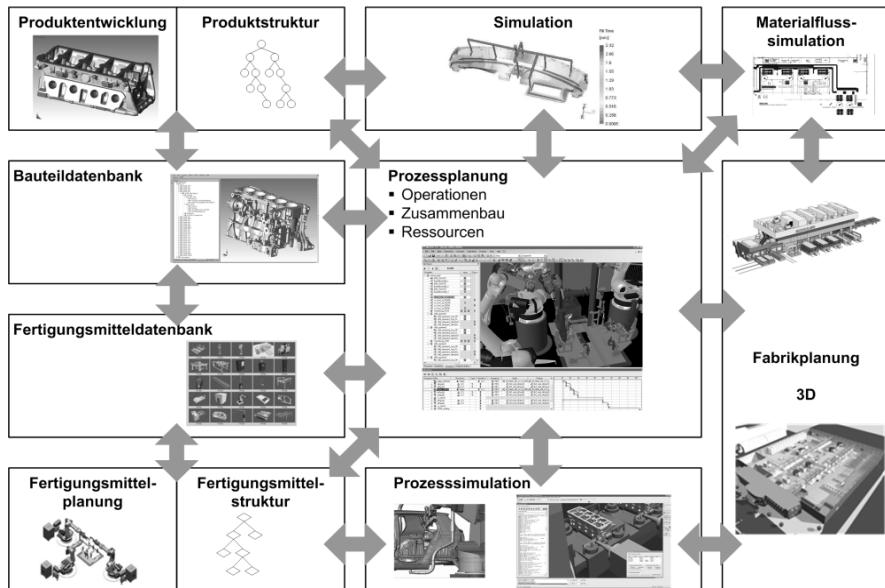


Abb. 1.8 Verstärkte Vernetzung durch die Digitale Fabrik (nach einem frühen Konzept der BMW AG, Reiter 2004b, S. 3)

Zur effizienten Gestaltung der Ablauforganisation müssen daher die bestehenden Prozesse überprüft und in ein effizientes Sollkonzept überführt werden. Dies bedeutet, dass sich für die sukzessive Einführung der DF auch die Aufbau- und Ablauforganisation ändern muss. Im Rahmen der Umsetzung stellt die Schnittstellenproblematik zwischen den Prozessen sowie zwischen den einzusetzenden Methoden und Werkzeugen ein weiteres großes Thema dar.

In einer Studie zur DF (Bracht und Spillner 2009) erfolgten am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) der TU Clausthal Auswertungen und Recherchen bezüglich des Umsetzungsstands der DF bei großen deutschen Automobilherstellern z. B. auch in den wesentlichen Handlungsfeldern Standardisierung, Datenmanagement, Systemintegration und Workflowmanagement sowie die grundsätzlich damit verbundenen Herausforderungen zur weiteren Umsetzung ermittelt (siehe Abb. 1.9).

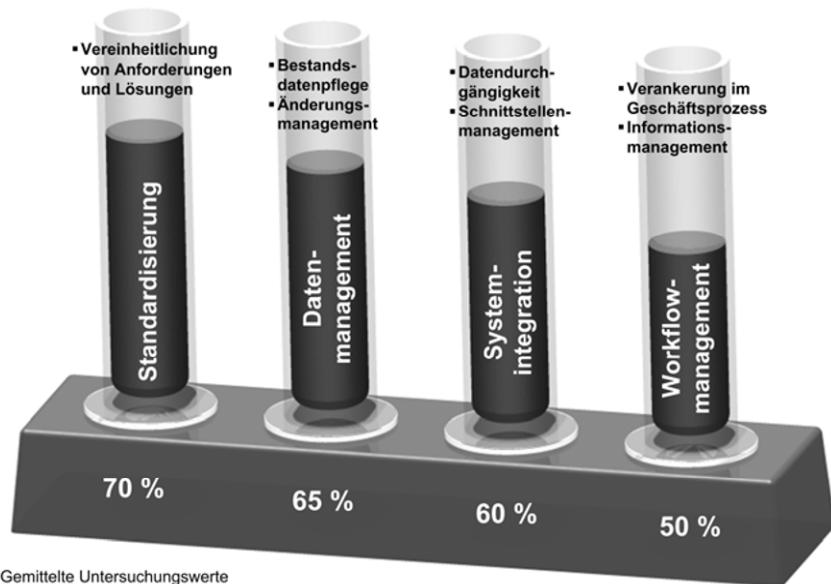


Abb. 1.9 Herausforderungen und Umsetzungsstand der Digitalen Fabrik bei den deutschen Automobilherstellern 2009 (Bracht und Spillner 2009, S. 650)

Im Bereich der Standardisierung z. B. bezogen auf Produkte, Prozesse und Musterlösungen ist die Umsetzung am weitesten fortgeschritten, da sie eine Grundvoraussetzung für die Einführung von IT-Werkzeugen und Methoden darstellt. Zur weiteren Umsetzung gilt es, vor allem das Anforderungsmanagement entschlossener voranzutreiben. Für den gesamten Planungsprozess müssen die Anforderungen für jeden Planungsschritt ermittelt und abgestimmt werden. Erst diese klare Strukturierung ermöglicht eine verbindliche Einführung von Werkzeugen und Methoden.

Im Bereich des Datenmanagements besteht noch ein großer Handlungsbedarf im Änderungsmanagement sowie der Bestandsdatenpflege. Das Änderungsmanagement soll sicherstellen, dass Planungsänderungen systematisch erfasst, im Datenmanagementsystem gepflegt und alle Betroffenen informiert werden. Erst die Vollständigkeit, Konsistenz und Aktualität aller Daten gewährleistet eine hohe Zeit- und Kostentransparenz und eine qualitativ hochwertige Planung. Bezuglich der Bestandsdatenpflege müssen klare Zuständigkeiten definiert werden. Dies betrifft nicht nur die Planungsdaten, sondern auch die Übertragung der Betriebsdaten aus der Realität in die digitale Welt. Hier ergibt sich ein Zielkonflikt, da die Pflege der Bestandsdaten häufig im ersten Schritt keinen Nutzen für die Verantwort-

lichen mit sich bringt. Erst die Verwendung dieser Daten für die Planung liefert den erwünschten Vorteil.

Diese *Durchgängigkeit der Daten* muss auch systemseitig sichergestellt werden. Dabei ist die Umsetzung im Bereich der Systemintegration mit 60% weniger weit fortgeschritten als beim Datenmanagement. Zur Verbesserung der Systemintegration müssen zunächst noch weitere bestehende Insellösungen integriert werden. Es bedarf einer weitreichenden Abstimmung zwischen Datenmodell und verwendeten Werkzeugen. Dazu gilt es, zwischen den einzelnen Planungsbereichen abgestimmte Softwareschnittstellen zu verwenden, die eine durchgängige Datennutzung ohne hohen Konvertierungsaufwand und mit minimalem Informationsverlust ermöglichen.

Im Bereich des letztendlich angestrebten Einsatzes von Lösungen für ein Workflowmanagement ist die Umsetzung am geringsten; sie liegt erst bei ca. 50 %. Hier sind bei vielen Planungsprozessen weitere inhaltliche, systematische und programmierende Vorarbeiten nötig.

Eine Zukunftsstudie des Virtual Dimension Centers (VDC 2016) zeigt für Unternehmen umfassend Visionen und Szenarien zum Einsatz der 3D-Technologie in der Industrie für das Jahr 2025 auf.

1.3.2 Maschinen- und Anlagenbau

Neben der Einführung von Werkzeugen und Methoden der DF im eigenen Unternehmen sind die Automobilhersteller bemüht weitere Potenziale über die gesamte Wertschöpfungskette und damit auch über die Grenzen des eigenen Unternehmens hinaus zu erschließen (Wortmann 2001). Ein Ziel ist die bestmögliche Unterstützung der eigenen Planungsprozesses und die damit verbundene Vorgabe der Verwendung der eigenen digitalen Planungswelt. Daher fließen in das Lastenheft zur Ausschreibung beispielsweise einer neuen Produktionsanlage nicht nur die Anforderungen an die Funktionalität und Leistung ein, sondern auch zunehmend Vorgaben bezüglich einzuhaltender Datenformate und -strukturierungen (Horn 2005b). Somit wird die durch die steigende Anzahl am Markt angebotener Systeme zunehmende Schnittstellenproblematik auf die Lieferanten verlagert. Für die Maschinen- und Anlagenbauer gilt es daher, den Anforderungen verschiedener Kunden mit unterschiedlichen Systemplattformen, CAD- und Planungssystemen sowie Vorgehensweisen in der Planung gerecht zu werden (Fedrowitz 2007; Horn 2005a). Zukünftig wird die Anwendung der Methoden und Werkzeuge der DF ein weiteres Auswahlkriterium für die Zulieferer der Automobilisten sein, (Abb. 1.10) vermittelt

einen Eindruck, welche Darstellung einer angebotenen Fertigungsanlage erwartet wird.

Jedoch ergeben sich durch diese intensivierte Zusammenarbeit mit den Automobilherstellern auch zahlreiche Potenziale für die Maschinen- und Anlagenbauer selbst, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzen müssen und in der Umsetzung begriffen sind (Bracht und Maserat 2006a).

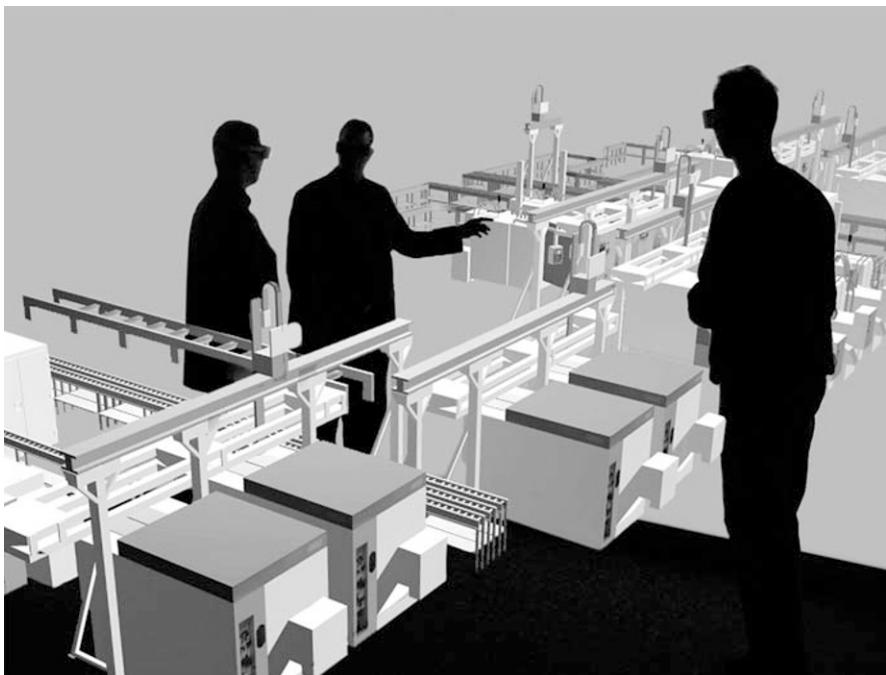


Abb. 1.10 Virtuelle Planung einer Fertigungsanlage für Zylinderköpfe (Quelle: TU Clausthal, IMAB)

Es gibt grundsätzlich zwei Ansatzpunkte für die Einführung der DF (Keil et al. 2006). Eine Orientierung am Produktmodell (produktspezifisch) beschreibt einen Planungsansatz von „Innen nach Außen“ und unterstützt insbesondere die Neuplanung von Serienfertigungen. Dem gegenüber steht der produktneutrale Ansatz, der sich mehr an der Fabrik ausrichtet. Dieser von „Außen nach Innen“ gerichtete Planungsansatz orientiert sich am Materialfluss und Layout und unterstützt die Umplanung von bestehenden Produktionsstätten sowie die Neuplanung von Einzel- und Kleinserienfertigungen.

Als Zulieferer der Automobilindustrie setzt beispielsweise die Dürr AG bereits heute Methoden und Werkzeuge der DF ein (Schulz 2007). Diese bestehen im Kern aus einer Datenbasis mit zugehöriger Integrationsplattform. Dieser Kern wird durch die Softwarewerkzeuge eines Herstellers abgedeckt. Die jeweiligen Methoden werden durch verschiedene geeignete Softwarewerkzeuge unterstützt, wobei der Kunde durch direkte Vorgabe oder Forderung eines speziellen Datenformates bestimmt, welches zum Einsatz kommt. Somit muss Dürr als Anlagenlieferant der Automobilindustrie für jeden Kunden das jeweilige Softwareprogramm vorhalten. Dies ist nicht nur mit hohen Kosten durch Softwarelizenzen und notwendigen Personalschulungen verbunden, zusätzlich muss auch noch die spezielle Durchgängigkeit der Daten über geeignete Schnittstellen sichergestellt werden.

Der Industrieroboterhersteller Kuka GmbH hingegen verfolgt eine andere Strategie (Fedrowitz 2007). Für die notwendige Integration der Daten, Systeme und Prozesse entlang des Anlagenentstehungsprozesses sowie eine Integration der Partner in die Prozesskette arbeitet Kuka an einer unternehmensspezifischen Lösung.

Kuka transformiert, konvertiert und filtert alle eingehenden kundenspezifischen Daten. Das daraus entstehende Datenmodell liegt nun in einer unternehmenseigenen Form vor. Somit ist der digitale Anlagenplanungsprozess unabhängig vom Auftraggeber. Das Planungsergebnis wird dann wieder in ein kundenspezifisches Format umgewandelt. Der Kunde kann die aktuellen Daten von Kuka über ein externes Interface direkt abrufen, welches die benötigten Daten entsprechend zur Verfügung stellt. Der steigende Aufwand durch die Umwandlung der Kundendaten steht einer Effizienzsteigerung durch die Standardisierung der eigenen Planung und Konstruktion gegenüber (Fedrowitz 2007).

1.3.3 Schiffbau

Neben dem Automobil- und Maschinenbau hat die DF auch beim Schiffbau Fuß gefasst, obwohl dort in der Regel nur Kleinserien oder Einzelprodukte hergestellt werden. Weiterhin sind durch die langen Fertigungszeiten auf einer Werft immer nur sehr wenige Schiffe gleichzeitig im Bau.

Die Fertigung eines Schiffes erfolgt in der Regel segmentweise: dazu wird zunächst die Hülle aus Einzelteilen zusammengeschweißt. Für den Innenausbau sind einzelne vorgefertigte Module vorgesehen, z.B. für die Kabinen. Diese Module werden jedoch aufgrund des immensen Platzbedarfes und der geringen zur Verfügung stehenden Logistikfläche, an einer anderen Stelle der Werft zusammengestellt und dann sukzessive in den

Schiffskörper eingebaut. Abschließend erfolgt die individuelle Ausstattung der einzelnen Module.

Die Themen Qualität und Individualität sind auch hier wichtig, insbesondere im Bereich von Kreuzfahrtschiffen steigen ständig die Anforderungen der Kunden. Bei der Meyer Werft ist man bereits seit Jahren von den Vorteilen der DF oder in diesem Falle der digitalen Werft überzeugt (Hartmann 2007). Diese werden beispielsweise in einer Verringerung der Planungszeit, einer verbesserten Ressourcennutzung und einer Erhöhung der Planungssicherheit gesehen (vgl. Abschnitt 7.8). Das Konzept der digitalen Werft, wie Abbildung 1.11 zeigt, verbindet den Produktplanungs- mit dem Produktherstellungsprozess.

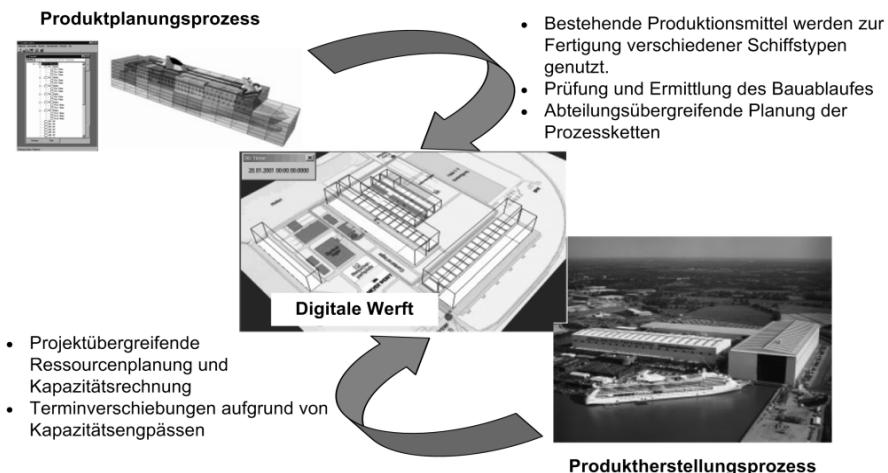


Abb. 1.11 Einbindung der Digitalen Fabrik im Schiffbau (nach Hartmann 2007)

Das Gesamtkonzept beinhaltet die Überprüfung der Baubarkeit der verschiedenen Schiffstypen auf bestehenden Produktionsanlagen, die Ermittlung des Bauablaufes sowie die abteilungsübergreifende Planung der Prozessketten. Daraufhin wird eine projektübergreifende Ressourcenplanung und Kapazitätsrechnung durchgeführt, welche ggf. Terminverschiebungen aufgrund von Kapazitätsengpässen sichtbar macht. Die Meyer Werft setzt dazu die eigene Weiterentwicklung eines am Markt erhältlichen, kommerziellen Simulationswerkzeugs ein, welches auf die Bedingungen des Schiffbaus angepasst und ständig weiterentwickelt wird.

1.3.4 KMU

Während große Unternehmen zahlreiche Methoden und Werkzeuge der DF einsetzen und/oder weiter erforschen, haben sich viele KMU noch nicht grundlegend mit dieser Thematik beschäftigt (Zäh und Schack 2006).

Eine Studie zum Umsetzungsstand der DF bei KMU im Jahre 2005 (Bierschenk et al. 2005) ergab, dass erst bei einem Fünftel der befragten Unternehmen Werkzeuge der DF zum Einsatz kommen und nur jedes weitere zehnte Unternehmen den Einsatz plant. Im Gegensatz zu den Automobilherstellern sind die KMU also noch weit von der Umsetzung der DF entfernt. Dies liegt vor allem an den speziellen Randbedingungen wie beispielsweise die begrenzte Personalkapazität, mangelndes Fachwissen auf dem Gebiet der DF sowie beschränkte Investitionsmöglichkeiten (Zäh und Schack 2006).

Die Einführung dieser Methoden und Werkzeuge bedingt eine Anpassung der Geschäftsprozesse (Zäh et al. 2005b). Häufig besitzen KMU jedoch nur wenig Erfahrung mit solchen Veränderungsprozessen. Die bisher angebotenen Werkzeuge der großen Softwarehäuser sind eher für Konzerne gedacht und haben daher in der Regel für KMU einen zu großen Funktionsumfang, der nicht benötigt wird. Auch deshalb stehen die Kosten für Lizenzgebühren bisweilen noch nicht in einem wirtschaftlichen Verhältnis zum erwarteten Nutzen.

Ein wichtiger Ansatz liegt deshalb darin, die jeweils relevanten Methoden und Werkzeuge zu identifizieren (siehe Kapitel 4) und entsprechende Konzepte zu deren Einführung (siehe Kapitel 6) zu entwickeln.

1.4 Die Digitale Fabrik – eine grundlegende Basis für Industrie 4.0

Die neuen Begriffe im Kontext des Einsatzes der IT in Produktion und Logistik, wie DF, Industrie 4.0 und Smart Factory, sorgen für Verwirrung in den Unternehmen. Dabei soll die Informationstechnik eigentlich die Produktionsprozesse bestmöglich unterstützen. Das geschieht zwar schon jetzt, doch mit Industrie 4.0 soll die Produktion auf eine neue Entwicklungsstufe gehoben werden (Strehlitz 2015; Bauernhansl et al. 2014).

Gemäß der Definition des Zentralverbandes Elektrotechnik und Elektroindustrie (ZVEI) steht Industrie 4.0 für die vollständige Digitalisierung und Integration der industriellen Wertschöpfungskette. Die Verbindung von Informations- und Kommunikationstechnologie mit der Automatisierungstechnik zum Internet der Dinge und Dienste soll immer höhere Grade

der Vernetzung in und zwischen Produktionsanlagen, vom Lieferanten bis zum Kunden ermöglichen.

Das Ziel von Industrie 4.0 ist letztlich die smarte Fabrik, in der alle Komponenten – Produkte, Maschinen, Menschen und Werkzeuge – vernetzt sind und miteinander in Echtzeit kommunizieren können (siehe auch Abschnitte 2.6, 7.10 und 7.11).

Laut Bauernhansl (2016) (vgl. auch Strehlitz 2015) dient die DF als Basis für Industrie 4.0. Während die DF Werkzeuge zur Planung von Fabriken in der virtuellen Realität und Modelle zur Verfügung stellt, geht es bei der Smart Factory vor allem um den Betrieb und die Optimierung der Fabrik in Echtzeit. Mit der DF können wesentliche Grundlagen, z.B. Modelle und Funktions- sowie Ablaufsimulationen bereitgestellt werden, die dann Ausgangsbasis für neue vernetzte digitale Anwendungen im Rahmen von Industrie 4.0 sind.

2 Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik im Überblick

Mit dem Konzept der DF sowie deren Methoden und Werkzeugen lassen sich zahlreiche Anwendungsfelder im Rahmen der Unternehmensprozesse (vgl. Abb. 1.7) erschließen. Mögliche Anwendungsgebiete der DF in der Reihenfolge der Lebenszyklusphasen von Produkt bzw. Produktionssystem zeigt die VDI 4499 auf (Abb. 2.1).

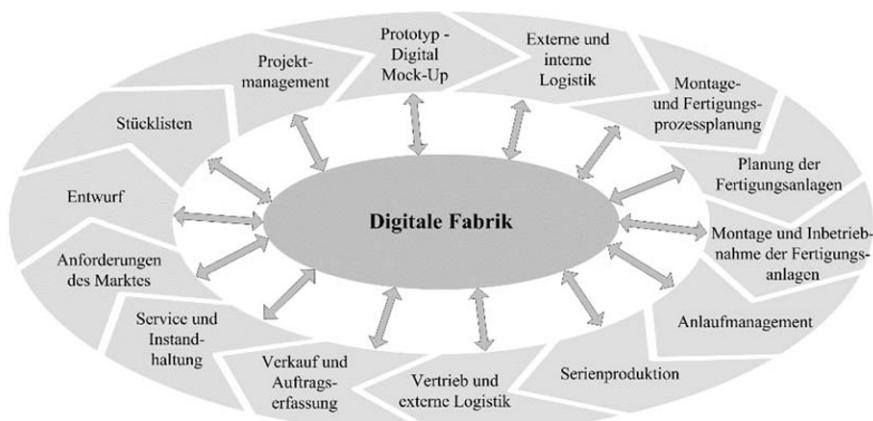


Abb. 2.1 Anwendungsgebiete der Digitalen Fabrik (in Anlehnung an VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 5)

Die Richtlinie VDI 4499 Blatt 1 (2008) definiert und erläutert in diesem Zusammenhang als wesentliche Anwendungsgebiete die Produktentwicklung, die Produktionsplanung, den Produktionsanlauf, den Produktionsbetrieb und die Auftragsabwicklung.

Der Vorgabe der VDI 4499 folgend haben die Autoren eine Auswahl der aus ihrer Sicht schon jetzt am intensivsten erschlossenen Anwendungsfelder getroffen. Sie sind in der Abbildung 2.2 von der Planung der Fabrikhülle bis zum Anlauf der Anlagen dargestellt und werden in diesem Kapitel im Überblick erläutert und anhand kleiner Beispiele vorgestellt, um

dem Leser ein frühes und kompaktes Gesamtverständnis zu vermitteln. Das Kapitel endet mit der Zukunftsvision der Produktion mit Industrie 4.0.

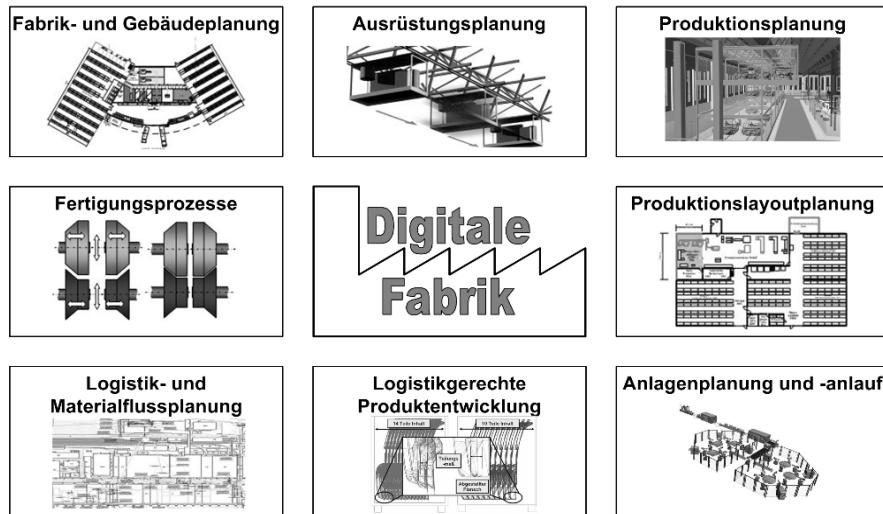


Abb. 2.2 Ausgewählte Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik im Überblick

Ausführliche Betrachtungen des Nutzens der DF (Kapitel 3), der einsetzbaren Methoden (Kapitel 4) und Softwarewerkzeuge (Kapitel 5) sowie vertiefende Anwendungsbeispiele (Kapitel 7) finden sich in den weiteren Kapiteln dieses Buches.

2.1 Fabrik-, Gebäude- und Ausrüstungsplanung

Produktionsunternehmen müssen sich zur Erhaltung ihrer Wettbewerbsfähigkeit möglichst schnell den sich ständig ändernden Markt- und Produktanforderungen anpassen. Dazu bedarf es nicht nur einer schnellen Produktentwicklung und Produktionsplanung, sondern auch einer anpassungsfähigen Fabrikstruktur. Daher müssen Gebäude und Produktionseinrichtungen zunehmend wandlungsfähig, flexibel, modular und nutzungsneutral sein (Westkämper et al. 2000; Wiendahl und Hernández 2002; Reinhart et al. 2002). Bei Neu- und Umplanungen gilt es daher, diesen Forderungen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die Fabrikplanung nimmt hierbei eine Schlüsselfunktion ein, da sie die Basis für alle zukünftigen Aktivitäten darstellt.

2.1.1 Fabrikplanung

Durch die hohe Komplexität von Fabrikplanungsprojekten und die praktisch unbegrenzte Zahl von Lösungen ist es nicht möglich, eine objektiv beste Lösung zu finden. Dies liegt an den sich stetig ändernden Randbedingungen sowie den unterschiedlichen und häufig konkurrierenden Zielen der Investoren, Nutzer und Planer. Insbesondere die Vielzahl der an der Planung beteiligten unterschiedlichen Fachdisziplinen erfordert ein schrittweises Vorgehen und den regelmäßigen Austausch der Planungsbeteiligten und -betroffenen (Wiendahl 1996; Wiendahl et al. 2014b).

„Fabrikplanung ist der systematische, zielorientierte, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion.“ (VDI 5200 Blatt 1 2011, S. 3)

„Aufgabe der Fabrikplanung ist es, unter Berücksichtigung zahlreicher Rahmen- und Randbedingungen die Voraussetzung zur Erfüllung der betrieblichen Ziele sowie der sozialen und volkswirtschaftlichen Funktionen einer Fabrik zu schaffen. Das heißt, die Fabrikplanung muss einen technisch einwandfreien und wirtschaftlichen Ablauf des Produktionsprozesses bei guten Arbeitsbedingungen für die in der Fabrik tätigen Menschen ermöglichen.“ (Kettner et al. 1984, S. 3)

Die Literatur kennt eine Vielzahl von Planungssystematiken, welche die Planungsabläufe der Fabrikplanung unterschiedlich darstellen und zu ihrer Bewältigung anleiten (Pawellek 2014; Grundig 2015; Aggteleky 1987; Kettner et al. 2010; Wiendahl 1996; Schenk et al. 2014; Wiendahl et al. 2014b). Ihnen allen ist die Einteilung des Planungsablaufs in verschiedene Phasen bzw. Stufen zunehmender Genauigkeit gemeinsam. Diese Phasen müssen nicht zwingend nacheinander ablaufen, sondern können auch fließend ineinander übergehen. Insbesondere aus Gründen der Zeit- und Kostenrestriktionen sind vor allem in den letzten Jahren zahlreiche Erfahrungen aus dem Bereich der Produktentwicklung eingeflossen, die eine möglichst weitgehende Parallelisierung einzelner Planungsphasen zum Ziel haben (Wiendahl und Hernández 2002). Überdies besteht im Planungsablauf die Möglichkeit zahlreicher Rückkopplungen bzw. Iterationen.

Bei einem stufenweisen Vorgehen kommt dem Prinzip der Planung "vom Groben zum Feinen" besondere Bedeutung zu (Kettner et al. 2010).

Durch die Anwendung digitaler Planungssysteme ist jedoch auch die durchgängige Planung vom Feinen zum Groben (Grundig 2015), möglich. Häufig werden, z. B. bei kooperativen Planungsansätzen, beide Sichtweisen zusammengeführt (Wiendahl et al. 2001). Ein weiteres wichtiges Planungsprinzip stellt die Planung "vom Idealen zum Realen" dar. Das zunächst zu erstellende Ideallayout dient im Bereich der Layoutplanung dazu, einen Maßstab für die Bewertung der im Zuge der Realplanung entwickelten Lösungsvarianten zu schaffen und die Auswahl einer Vorzugsvariante zu erleichtern.

Neben der Beachtung dieser Prinzipien ist ein weiterer wichtiger Aspekt die Frage nach dem Verhältnis von Aufwand und Nutzen einer Planung. Nach Agteleky ist es stets erforderlich, den Nutzen einer bestimmten Planungstiefe dem dafür notwendigen Aufwand gegenüberzustellen. Die Maxime lautet hier also: "So viel wie nötig – so wenig wie möglich" (Agteleky 1987). Die angesprochenen Gesichtspunkte sind in dem in Abbildung 2.3 dargestellten Planungsablauf zusammengefasst.

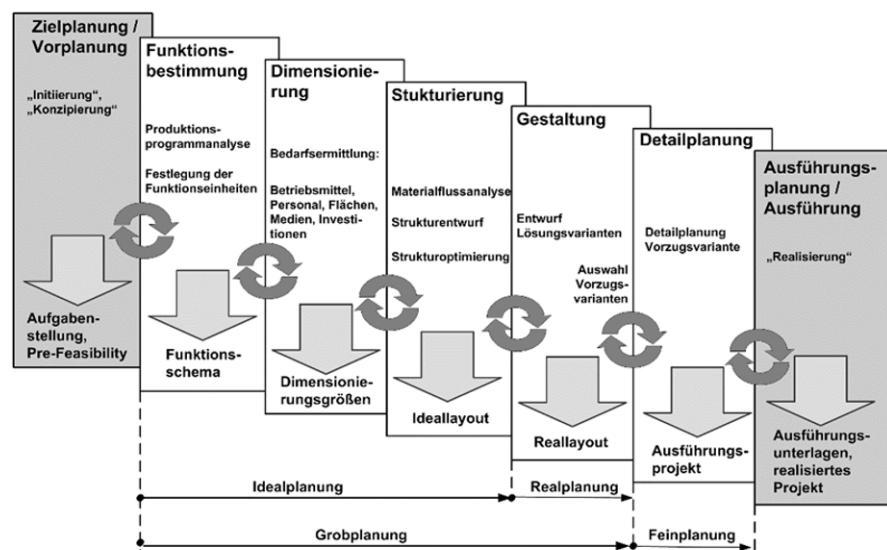


Abb. 2.3 Planungsablauf des Fabrikplanungsprozesses (in Anlehnung an Grundig 2015; Kettner et al. 2010)

Die stufenweise Planung erfolgt vom Groben zum Feinen und vom Idealen zum Realen. Nach ersten Konzepten in der Zielplanung folgen immer weiter ins Detail gehende Planungsphasen, die häufig schon beginnen, während die vorherige Phase noch nicht abgeschlossen ist. Bei diesem

Ansatz sind Rückgriffe in vorgelagerte Planungsphasen möglich, wenn Korrekturen am aktuellen Bearbeitungsstand vorgenommen werden müssen. Außerdem ist es sinnvoll, diese Rückgriffe nicht nur auf direkt vorgelagerte Phasen zu beschränken, sondern sie aus jeder Phase auch auf weiter zurückliegende Phasen zu ermöglichen. Zudem sind phaseninterne Schleifen unerlässlich, da mögliche Planungsfehler und eventuell darauf aufbauende Entscheidungsfehler einen großen Einfluss auf die Planungskosten und den weiteren Verlauf der Planung haben können (Grundig 2015).

Hierzu definiert jetzt umfassend und ganzheitlich die neue VDI 5200 ein Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses (Abb. 2.4).

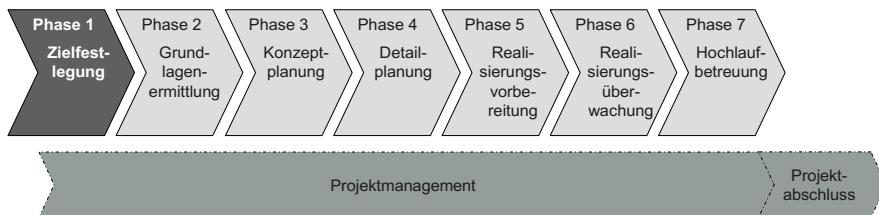


Abb. 2.4 Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses (nach VDI 5200 Blatt 1 2011, S. 5)

In der Richtlinie 5200 wird darüber hinaus großer Wert auf eine integrierte Betrachtung der Produktions- und Gebäudeplanung gelegt.

Die detaillierte technologische Projektierung, deren einzelne Phasen, Stufen und Schritte werden für alle Systeme der Fabrik in einem Handbuch umfassend abgearbeitet und durch Beispiele unterstützt (Helbing 2010).

In den letzten Jahren sind in der Fabrikplanung neue Aspekte in den Vordergrund gerückt, die in den klassischen Planungsansätzen kaum Berücksichtigung finden. Daher werden in den folgenden Unterabschnitten beispielhaft die Wandlungsfähigkeit (als Planungsprämissen) und die partizipative Planung (als neuer Planungsansatz) vorgestellt.

Wandlungsfähige Fabrik

Neben der reinen funktionalen Planung einer Fabrik gilt es, eine Fabrikstruktur so zu gestalten, dass sie auch in der Lage ist, veränderten Zielsetzungen und Strategien des Unternehmens gerecht zu werden (Wiendahl et al. 2001; Wiendahl et al. 2014b; Wiendahl et al. 2014a; Reinhart et al. 2002; Nyhuis et al. 2009; Westkämper et al. 2000). In dieser Wandlungsfähigkeit sehen noch weitere Autoren den derzeitigen Schlüsselfaktor in der Fabrikplanung (Schuh et al. 2007). Vielfach fehlten jedoch noch ge-

eignete Ansätze und Methoden, um diese Forderung an die Fabrikplanung umfassend zu erfüllen. Diese Lücke schließt das Handbuch Fabrikplanung (Wiendahl et al. 2014b) durch eine Planungssystematik der sogenannten synergetischen Prozess- und Raumplanung.

Ziel des Ansatzes ist es, die Gebäudeplanung in die frühen Phasen der Produktionsplanung einzubeziehen, um wandlungsfähige, kommunikative und logistikorientierte Lösungen zu erhalten. Als Schlüsselbegriffe gelten die sogen. Wandlungsbefähiger Mobilität, Universalität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität.

Partizipative Planung

Im Bereich der Planungssystematik finden zunehmend kooperative und integrative Planungsansätze Verbreitung. Allen Beteiligten steht dabei eine Visualisierungs- und Kommunikationsplattform zur Verfügung, die in gemeinsamen Planungssitzungen beispielsweise zur Fabrikplanung genutzt werden kann (Bracht 2001).

Der Fabrikplanungsprozess wird von einem interdisziplinären Team verschiedener Fachleute durchgeführt, wobei der Fabrikplaner eine moderierende und integrierende Rolle einnimmt. Durch die frühzeitige Einbeziehung betroffener MitarbeiterInnen in den Planungsprozess lassen sich beachtliche Potenziale erschließen. Dabei steigt die Planungsqualität durch die Berücksichtigung des zusätzlichen, häufig nicht dokumentierten, Wissens dieser MitarbeiterInnen an. Weiterhin wird dadurch die Akzeptanz des Planungsergebnisses erheblich gesteigert. Werkzeuge wie der 2D/3D-Planungstisch (Abb. 2.5) unterstützen eine solche interdisziplinäre und partizipative Planung sehr gut und finden vermehrt Anwendung (siehe auch Beschreibung in Abschnitt 4.11).

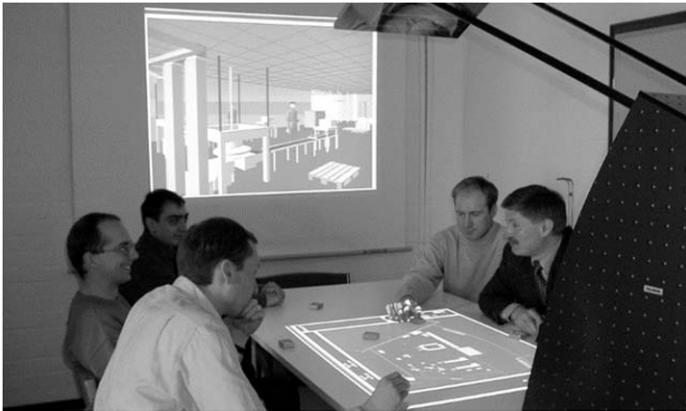


Abb. 2.5 Partizipatives Planungswerkzeug 2D/3D-Planungstisch (Quelle: TU Clausthal, IMAB)

Dieses Planungswerkzeug wurde speziell auf die Anforderungen der partizipativen Planung mit den Nutzern hin entwickelt. Somit können in verschiedenen Sitzungen grundsätzliche Layoutkonzepte entwickelt werden, wobei die Feinplanung weiterhin über ein CAD-Tool erfolgt. Durch die intensive Nutzung dieser partizipativen Planungsinstrumente sowie die konsequente Planung in 3D lassen sich Planungsfehler wie Kollisionen zwischen Planungsobjekten oder fehlende Sichtverbindungen erkennen und beheben. Diese Planungsfehler werden für alle Beteiligten dann in einer VR-Großprojektion sichtbar und die Maßnahmen zur Behebung können rasch abgestimmt werden (Brosch 2014).

2.1.2 Gebäudeplanung

Mit den raschen Produktänderungen müssen sich Produktionsgebäude wechselnden Gegebenheiten möglichst gut anpassen.

Die Gebäudeplanung umfasst die architektonische Gestaltung der Fabrik in nutzungsneutralen Gebäuden, welche die Anforderungen aus Prozesssicht unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit bestmöglich erfüllen (Schenk et al. 2014; Wiendahl et al. 2014a).

Durch den Einsatz digitaler Werkzeuge kann die Entwicklung einer Fabrik heute stärker „von Innen nach Außen“ erfolgen. Während in der Vergangenheit die Anforderungen an eine Fabrikhalle eher langfristig festgelegt waren, ist heute eine angemessene und bezahlbare Wandlungsfähig-

keit zwingend. Das Gebäude bildet die „Hülle“ um die Produktion; daher sollte sie wenige Restriktionen vorgeben, um das Innere möglichst einfach verändern zu können. Dies betrifft im Wesentlichen die Hallenhöhe, Spannweite und den Hallebnoden. Zum einen sollen die geplanten Montageabläufe und Materialflüsse kollisionsfrei sein, andererseits sollen aber Änderungen durch Umnutzung aufwandsarm möglich sein (Sauer 2002).

Die funktionale Anordnung der Produktionsbereiche bestimmt im Wesentlichen die Architektur des Gebäudes. Dabei werden Fabriken nicht nur nach industriellen, fertigungs- und gebäudetechnischen Gesichtspunkten geplant. Ebenso wie das Produkt sich ständig wandelt und die zugehörigen Produktionssysteme, muss auch die Fabrik leben und sich verändern (Schönheit et al. 2000).

Dabei gewinnen Gesichtspunkte wie ein attraktives äußerer Erscheinungsbild zur Unterstützung des Unternehmensimages an Bedeutung. Wichtige Gestaltungsaspekte wie eine produktive und attraktive Arbeitsumgebung, die sich positiv auf die MitarbeiterInnen auswirkt, sollten ebenfalls verstärkt Beachtung finden (Wiendahl et al. 2014b). Durch die Visualisierung der Planung lassen sich beispielsweise verschiedene Farbgestaltungen auf deren Wirkung hin testen. Somit unterstützen moderne digitale Instrumente auch die Schaffung einer freundlichen und ansprechenden Arbeitsumgebung.

Schließlich müssen während der Gebäudeplanung und -ausführung zahlreiche baurechtliche und arbeitsrechtliche Vorschriften für Büros und Produktionshallen beachtet und eingehalten werden.

2.1.3 Ausrüstungsplanung

Anpassungsfähigkeit ist nicht nur eine Anforderung an das Fabrikgebäude, sondern ebenso an die technische Gebäudeausrüstung.

„Alle im Bauwerk eingebauten, daran angeschlossenen oder damit fest verbundenen technischen Anlagen und Anlagenteile werden als technische Anlagen in der Ausrüstungsplanung geplant. Dazu zählen u. a. Abwasser-, Wasser-, Gas-, Wärmeversorgungs-, Starkstrom- und Förderanlagen“ (Wiendahl et al. 2014a, S. 351).

Die verschiedenen Objekte eines Gebäudes gestalten unterschiedliche Fachplaner (Architekt, Stahlbau-, Fördertechnik-, Lüftungs-, Heizungs- und Elektroplaner). Dadurch entstehen parallele Modelle, bei denen es wegen der unterschiedlichen Sichten der Fachdisziplinen und spezifischen Planungsprozesse zu Abstimmungsproblemen kommen kann (Wiendahl et al. 2014b).

Zur ganzheitlichen Planung der Produktionsgebäude und -einrichtungen ist daher ein übergreifendes Informations- und Datenmodell sinnvoll, welches eine Zusammenführung von Anlagen- und Gebäudedaten ermöglicht. Die Integration eines Fabrik-DMU in die Planungsprozesse der Fabrikstrukturplanung zeigen Bracht und König (2012b) auf. Es gelingt damit detaillierte, gewerke-übergreifende virtuelle Fabrikmodelle zu erstellen.

Im Bereich der digitalen Fabrikplanung stellt das 3D-Fabrikmodell das Gesamtergebnis dar. In dieses werden die Ergebnisse der Teilplanungen integriert. Zur Visualisierung des 3D-Fabrikmodells ist eine VR-Großprojektionsanlage geeignet, welche die Ergebnisse der Teilplanungen in einer Gesamtansicht zusammenführt. Durch die maßstäbliche Projektion bietet dieses Instrument eine geeignete Kommunikations- und Diskussionsplattform für alle Planungsbeteiligten. Bracht und Gorke (2015b) zeigen hierzu die Vernetzung eines virtuellen Projektraums mit dem Fabrik-DMU der Fabrikstrukturplanung auf.

Mit Hilfe spezieller Software können räumliche Kollisionen lokalisiert werden. Gründe für Kollisionen können einerseits Planungsfehler sein (ungewollt); andererseits kollidieren Objekte dort, wo im Zuge der weiteren Planung gezielt notwendige Aussparungen z.B. für Leitungstrassen erforderlich sind (gewollt). Diese Kollisionen werden mittels einer Durchbruchsplanung beseitigt.

Neben den reinen 3D-Geometriedaten können die Planungsobjekte zusätzliche Metainformationen enthalten, die eine weitergehende Absicherung über die reine Kollisionsprüfung hinaus ermöglichen. Auf dieser Basis werden Konsistenzprüfungen der Planung durchgeführt. Beispielsweise wird untersucht, ob eine Maschine nicht nur mit allen benötigten Medien wie Strom, Wasser und Druckluft versorgt wird, sondern auch, ob die Versorgungsleitungen die benötigten Mengen der Maschine überhaupt bereitstellen können.

Einen modernen Ansatz stellt das *Modulare Bauen* dar, bei dem sich nicht nur die Tragkonstruktion und -Hülle durch eine hohe Flexibilität und leichte Anpassbarkeit bei Produkt- und Prozessänderungen auszeichnet, sondern auch die Energie- und Medienversorgung. Der modulare Aufbau ermöglicht die schnelle und einfache Erweiterung der einzelnen Funktionsbereiche bei Produktwechsel (Abb. 2.6).

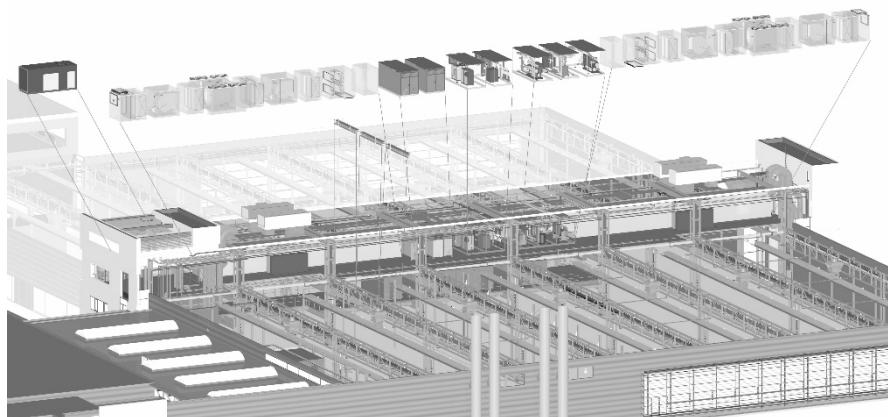


Abb. 2.6 Beispiel für Modulares Bauen der Versorgungsanlagen mit vorgefertigten Containern (Schwarz 2006, S. 26)

Die modulare Auslegung der einzelnen Versorgungsanlagen schafft eine hohe Flexibilität und sichert die Gewerkeübergreifende Konsistenz der Planung. Zudem wird der Bauablauf durch die Module wesentlich beschleunigt, da diese vorgefertigt zur Baustelle geliefert und dort schnell installiert werden können (Schwarz 2006).

2.2 Produktionsplanung

In produzierenden Unternehmen liegt der Fokus der Planung auf den wertschöpfenden Prozessen. Daher ist die Planung der Produkte und der Produktionsprozesse von zentraler Bedeutung.

„Produktionsplanung ist die ablauforganisatorische Gestaltung von Produktionsprozessen unter Festlegung der technologischen, zeitlichen, örtlichen, mengenmäßigen und logistischen Bedingungen.“ (Spur 2001a, S. 509)

Ziel der Produktionsplanung ist die Bewertung und Auswahl von Planungsalternativen sowie die Koordination und bestmögliche Auslastung der vorhandenen Ressourcen (Zäh et al. 2005a). Während in den einzelnen Planungsbereichen der Produktionsplanung Methoden und Werkzeuge stetig weiterentwickelt werden, stellen die Schnittstellen eine deutliche Schwachstelle hinsichtlich der Qualität und Konsistenz der zu transferierenden Daten dar. Diese Problematik zeigen Bracht und Schäfer-Nolte

(2013) insbesondere am Beispiel des Kooperationstypus Vertragsfertigung bei Automobilherstellern auf. Exemplarisch für die vielfältigen Abhängigkeiten wird dies in Abbildung 2.7 am Beispiel der Gebäude- und Produktionsplanung verdeutlicht.

Themenfelder der Gebäudeplanung	GEBÄUDE				GEBÄUDEAUSRÜSTUNG			SONSTIGE BEREICHE			
	Gebäudeform, Außenbereich	Bauphysik (z. B. Schall)	Tragwerk	Bodenmechanik	Aussen- und Innenwände	Medienversorgung	Entsorgung (z. B. Kühlmittel)	Beleuchtung, Klima, Heizung	Baulicher Brandschutz	Fluchtwegs, Sicherheit	Baurechtliche Auflagen, Gesetze
LOGISTIK											
Materialfluss	●		●	●	●				●	●	
Beschaffungslogistik											
Distributionslogistik											
Produktionslogistik											
PRODUKTIONSSTRUKTUR											
Flächenbedarfe	●		●			●		●			
Produktionslayout	●		●			●		●	●	●	
Betriebsmittel		●		●	●	●		●		●	●
Fördertechnik			●	●							
Lagertechnik	●		●	●				●			●
Neben- und Sozialräume	●	●			●	●	●	●	●	●	●
SONSTIGE BEREICHE						●			●	●	●
Personalstruktur		●							●	●	●

Abb. 2.7 Wechselwirkung zwischen Produktions- und Gebäudeplanung (Meierlohr 2003, S. 10)

Der klassische Planungsablauf (vgl. auch Abb. 2.3) sieht daher Iterationsschleifen zwischen den aufeinander folgenden Planungsphasen vor. Jedoch sollten unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit die Auswirkungen von Änderungen auf vorhergehende Planungsphasen geprüft und eine Entscheidung schnell getroffen werden, um eine ggf. erforderliche Iterationsschleife möglichst kurz zu halten.

Mit den Werkzeugen der digitalen Produktionsplanung werden die Fertigungs- und Montageprozesse kompletter Werke, Linien oder einzelner Arbeitsschritte geplant. Dabei erleichtern unternehmensspezifische Bibliotheken für Ressourcen, Betriebsabläufe und Best-Practice-Lösungen die schnellere und bessere Prozessgestaltung. Ein umfassendes Referenzmodell für Informationsprozesse z.B. in Vertragsfertigungsprojekten bei der Automobilherstellung hat Schäfer-Nolte (2015) entwickelt. Mithilfe der Simulation können Durchsätze bestimmt und Auswirkungen von Planungsänderungen untersucht sowie Kosten und Zeiten ermittelt werden.

Zur Produktionsplanung werden bestimmte Eingangsdaten benötigt. Dazu gehören neben den Produktdaten wie z. B. den Stücklisten, insbesondere Arbeitspläne und Angaben über vorhandene Maschinen sowie Informationen zu erforderlichen neuen Maschinen.

Mit den Methoden und Werkzeugen der digitalen Planung besteht nun zu einem frühen Zeitpunkt in der Entwicklung die Möglichkeit, neue Prozesse zunächst digital zu erproben, um deren Eignung und Umsetzbarkeit zu prüfen (siehe auch Abschnitt 7.6). Dies ist umso bedeutender, da sie einen häufig auftretenden Zielkonflikt auflösen können. Die Unternehmen möchten einerseits möglichst schnell neue und innovative Produkte auf den Markt bringen, wobei jedoch andererseits die Markteinführung durch den erstmaligen Einsatz innovativer Fertigungstechnologien verzögert wird (vgl. auch Huber 2016).

2.2.1 Planung von Fertigungsprozessen

„Fertigungsprozesse bestehen aus einer zeitlichen und räumlichen Folge von werkstückbezogenen Einzeloperationen, die eine Veränderung des stofflichen Zusammenhalts oder der räumlichen Anordnung durch Anwendung von Fertigungsverfahren bewirken.“ (Spur 2001c, S. 213)

Stellvertretend für verschiedene Fertigungsprozesse sollen im Folgenden am Beispiel des „Digitalen Prozessmusters“ für das Hochfrequenzschweißen die Potenziale der DF für die Gestaltung neuer Fertigungen aufgezeigt werden. Diese ermöglichen nicht nur die Planung und Absicherung bekannter Prozesse, sondern sie dienen auch der Erprobung neuer, unbekannter Verfahren.

Ein Digitales Prozessmuster ist die detaillierte, realitätsnahe virtuelle und simulationsfähige Abbildung eines Prozesses.

Das Modell enthält bereits produktionstechnische Elemente und Logistikkonzepte, die sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden (Bracht und Masurat 2003).

Das als Beispiel gewählte Verfahren des Hochfrequenzschweißens ist eine Fertigungstechnologie, welche vornehmlich zur unlösbarsten Verbindung von Kunststoffteilen zum Einsatz kommt. Im Rahmen der dargestellten Untersuchungen wurde die Eignung des Verfahrens zur Verbindung von Feinblechteilen überprüft. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der sehr kurzen Prozesszeit sowie der Möglichkeit, die Qualität der Schweiß-

naht anhand der Prozessparameter beurteilen zu können. Eine geringe und gleichmäßige Wärmeeinbringung beim Schweißen führt zudem zu sehr guten Nahteigenschaften.

In einer virtuellen Produktionszelle, die eine Anwendung des Hochfrequenzschweißens nachbildet, wird ein realistisches Bauteil in verschiedenen Varianten hergestellt. Es besteht aus drei Komponenten, die in der Hochfrequenzschweißanlage miteinander zu verbinden sind. Einen Überblick der untersuchten Produktionszelle zeigt die Abbildung 2.8.

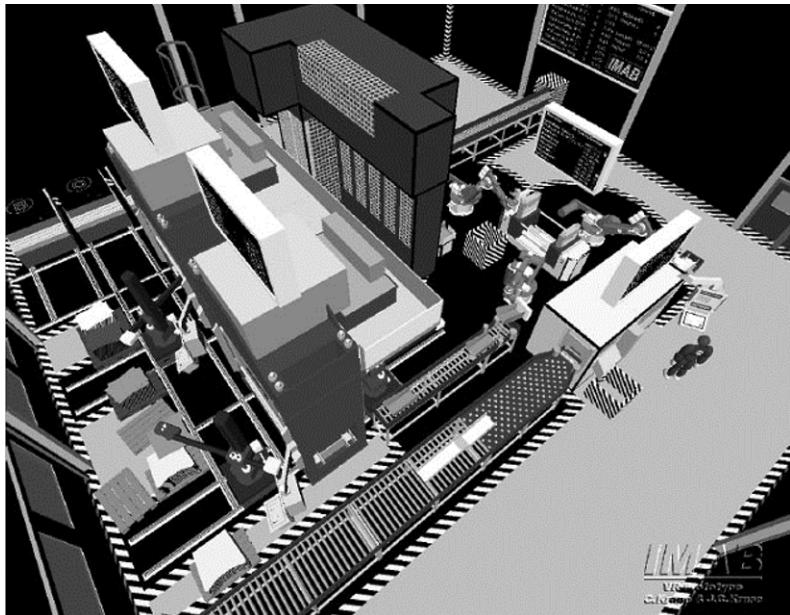


Abb. 2.8 Digitales Prozessmuster einer Produktionszelle für das Hochfrequenzschweißen

Mit diesem Prozessmuster wurde der Ansatz verfolgt, die Technologieauswahl bereits in eine frühe Planungsphase vorzuziehen. Eine sorgfältige Dokumentation der Produkt- und Prozessplanung sowie deren ständiger Abgleich ist dabei unabdingbar. Die Zusammenarbeit der Prozess-, Fertigungs- und Fabrikplaner konnte mit dieser Methode unterstützt und die gemeinsamen Ergebnisse konnten anschaulich visualisiert werden. Darüber hinaus konnte der Prozess umfassend untersucht und die Nebenzeiten sowie die Gesamtzeit des Prozesses reduziert werden.

2.2.2 Planung von Lackierprozessen

In der Karosseriefertigung hat die Oberflächenbehandlung wegen der Bedeutung für das Erscheinungsbild des Automobils und der immensen Kosten für die Lackieranlage einen hohen Stellenwert in der Produktionsplanung. Im Folgenden wird am Beispiel der Elektrotauchlackierung die frühzeitige virtuelle Prozessabsicherung thematisiert.

Durch die Simulation der Elektrotauchlackierung mittels der Finite-Element-Methode (FEM – Finite-Element-Methode) (siehe auch Abschnitt 4.6.1) kann die Schichtdickenverteilung d auf einer Karosserie vorhergesagt und liefert somit einen wichtigen Beitrag zum Korrosionsschutz (Abb. 2.9).

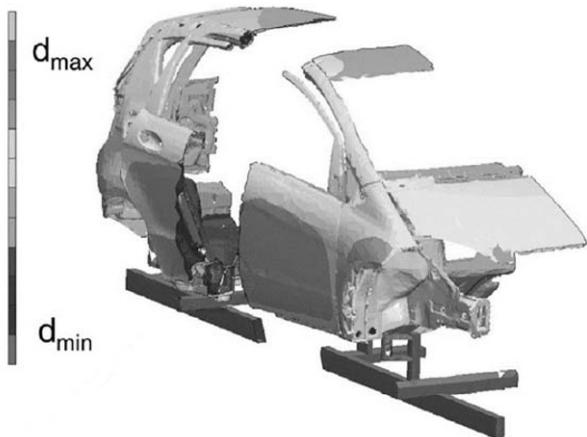


Abb. 2.9 Visualisierung der Schichtdickenverteilung bei der Elektrotauchlackierung

In Bereichen mit zu geringer Schichtdicke ermöglichen zum Beispiel zusätzliche Löcher in der Karosserie noch während der Bauteilkonzeption eine gleichmäßige Schichtdickenverteilung und somit einen besseren Korrosionsschutz. Weiterhin können konzipierte Produktionsprozesse durch Variation der Prozessparameter weiter verbessert werden (Bracht und Kurz 2005; Bracht und Ritz 2016).

Somit wird eine durchgängige Planung unterstützt und die Forderung nach paralleler Produkt- und Prozessentwicklung erfüllt. Dabei fließen Erkenntnisse aus der Prozessplanung zurück in die Produktplanung und es wird schneller eine höhere Produkt- und Prozessreife erzielt.

2.2.3 Planung von Montageprozessen

Industriell hergestellte Produkte bestehen in der Regel aus einer Vielzahl von Einzelteilen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden. Es ist Aufgabe der Montage, aus diesen Teilen ein Produkt höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen in einer bestimmten Zeit zusammenzubauen (Warnecke et al. 1975).

In der Automobilindustrie kommen für Montageprozesse verschiedene Verfahren zur Anwendung. Das Spektrum reicht von meist automatisierten Fügeverfahren wie Kleben oder Schweißen bis zu manuellen Montagetätigkeiten. Die Anforderungen an diese Prozesse sind sehr unterschiedlich, was sich auch in den zur Absicherung verwendeten Methoden widerspiegelt. Ein neues Konzept zur Planung und Absicherung von Mensch-Roboter-Kooperationen in der DF zeigen z.B. Zhang et al. (2017) auf. An den folgenden Beispielen soll die Bandbreite der Anwendungsbereiche in der Montage aufgezeigt werden.

Virtuelle Absicherung für das Fügeverfahren Kleben

Das Kleben gewinnt insbesondere in der Automobilindustrie an Bedeutung. In der Karosseriefertigung finden Klebstoffe zur Verbindung von Strukturauteilen, im Einbau von Windschutzscheiben und in der Modulmontage Verwendung. Der Vorteil des Klebens liegt hierbei in der gewichtsneutralen Versteifung der Karosserie. Weiterhin handelt es sich um wärmearme, stoffschlüssige Verbindungen, die sehr gut automatisierbar sind. Zur virtuellen Absicherung dieses Verfahrens dient eine Fügesimulation mittels FEM (siehe auch Abschnitt 4.6.1) zur Lösung des nicht-linearen dreidimensionalen Kontaktproblems zwischen den Fügeelementen (Kurz 2006). Dazu werden die CAD-Daten der Karosserie mit all ihren Anbauteilen, wie in Abbildung 2.10 zu sehen, in eine FE-Struktur (FE – Finite Element) überführt und mit weiteren Eingabedaten wie Werkstoffkennwerten sowie den für die FEM-Rechnung erforderlichen Randbedingungen ergänzt.

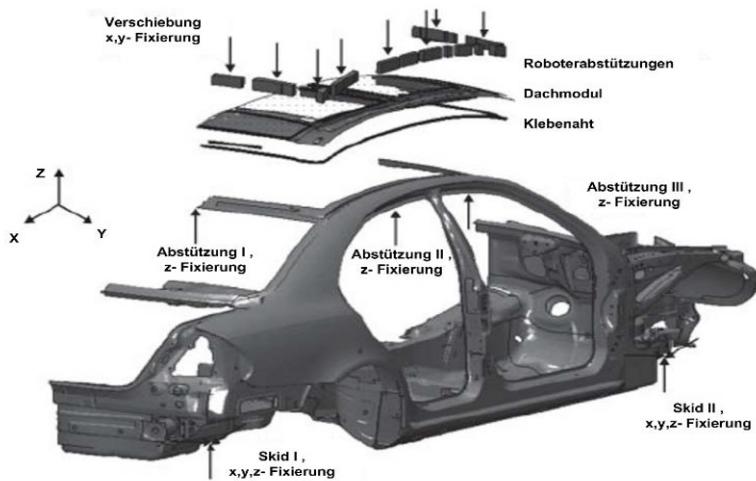


Abb. 2.10 Beispiel für eine Klebeverbindung im Rohbau (Dachmodul) (Bracht und Kurz 2004, S. 547)

Mittels einer Parameterstudie werden die Auswirkungen von Veränderungen der Prozessparameter auf den Fertigungsprozess analysiert. Die Ergebnisse dienen später als Bewertungskriterien. Zur Verifikation der Berechnungsmethode während der Entwicklungsphase wird das Simulationsmodell mit dem realen Fertigungsprozess verglichen. Abbildung 2.11 zeigt die Ergebnisse der Simulation des Fügeprozesses für dieses Dachmodul.

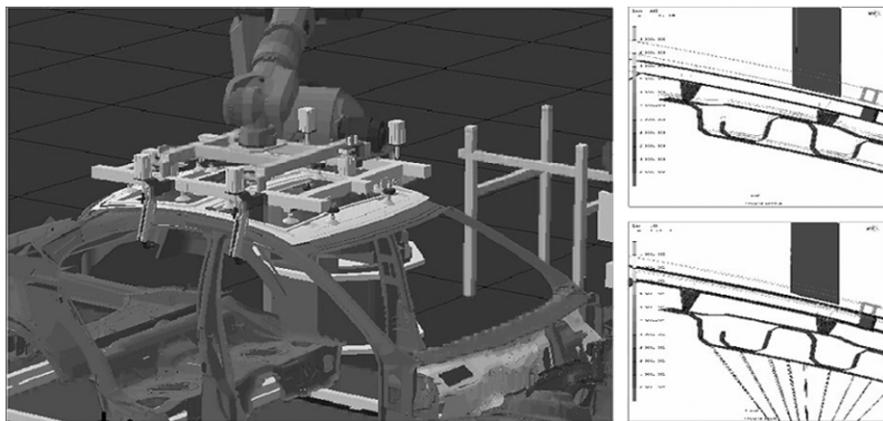


Abb. 2.11 Ergebnisse der Fügesimulation der Dachmodulmontage (Pfluger 2008, S. 7)

Mittels FEM (Abschnitt 4.6.1) werden die Verformungen von Kleber und Bauteilen während des Fügevorganges simuliert. Damit liefert die Simulation Erkenntnisse bezüglich der Notwendigkeit von Gegenhaltern, Verpressungsgüte der Kleberaube sowie Belastungsdaten zur Auslegung von Werkzeug und Roboter.

Planung der Montagebandbelegung

Neben der Planung und Absicherung der einzelnen Fertigungs- und Montageprozesse gilt es, diese auch wirtschaftlich zu betreiben. In der Automobilindustrie werden dazu spezielle Softwarewerkzeuge (z. B. auch zur personalorientierten Simulation nach Zülch 2010b) verwendet, um u. a. eine möglichst gleiche Taktzeit aller Arbeitsstationen eines Montagebandes zu gewährleisten (Abb. 2.12).

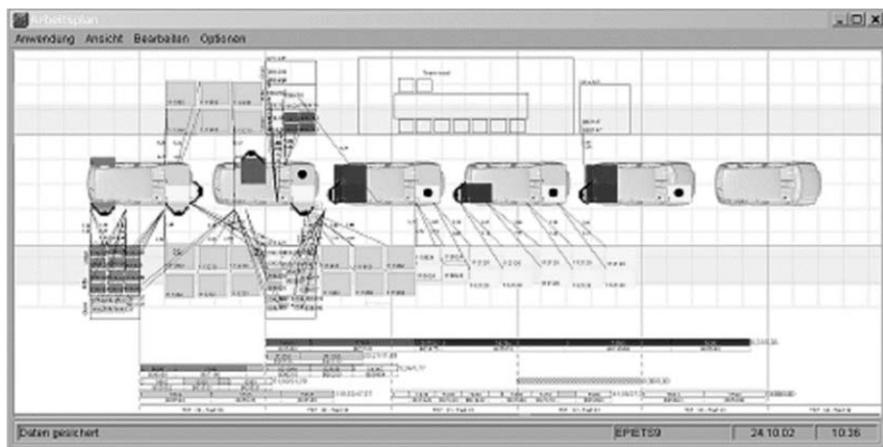


Abb. 2.12 Planung der Bandbelegung einer Automobil-Endmontage (Quelle: Volkswagen AG)

Bei der Planung der Bandbelegung sind verschiedene Restriktionen wie z. B. Verbaureihenfolgen zu beachten. Die Werkzeuge der DF ermöglichen eine beschleunigte Planung durch die Verwendung von Bibliothekselementen. Zudem können schneller verschiedene Varianten erzeugt und auf Grundlage hinterlegter Daten miteinander verglichen werden.

Ein erfolgreich weiterentwickelter Ansatz der DF zur optimierten Planung realgemischter Endmontagen ist das virtuelle Eintakten neuer Produktgenerationen (Bracht et al. 2012a).

Ergonomieuntersuchungen

Mithilfe einer Ergonomieuntersuchung können z. B. geplante manuelle Montagevorgänge bezüglich ihrer Auswirkungen auf die körperliche Beanspruchung der Werker überprüft werden. Somit können schon frühzeitig Überlastungen und ergonomisch ungünstige Arbeiten vermieden und neue Konzepte oder Hilfsmittel für die Montagetätigkeit entwickelt werden. Im Folgenden soll dies an einem Beispiel aus der Automobilindustrie vorgestellt werden (Abb. 2.13).

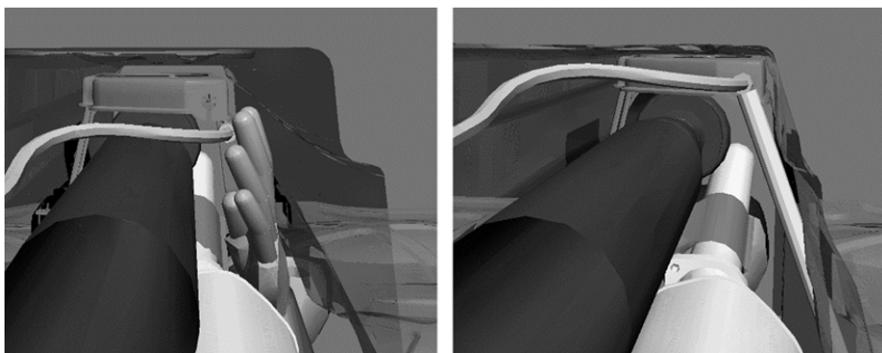


Abb. 2.13 Ergonomieuntersuchung am Beispiel einer Bremsseilmontage im Pkw

Das Beispiel zeigt die Montage des Bremsseils in einem Pkw. Die Ergonomieuntersuchungen beschränkten sich in diesem Fall auf zwei verschiedene Szenarien – den Einbau mit und ohne Werkzeug. Anhand der 3D-Geometrie des Einbauraums sowie eines digitalen Modells der menschlichen Hand wurden die beiden Szenarien digital erprobt (Walter 2002). Dabei zeigte sich, dass der Greifraum für eine rein manuelle Montage nicht ausreichend bemessen ist und eine Konstruktionsänderung erfordern würde. Das Thema Montageplanung wird im Abschnitt 7.4.5 ausführlich behandelt.

2.2.4 Produktionslayoutplanung

Nach der Planung der Fertigungs- und Montageprozesse gilt es, die entwickelten Anlagen und Arbeitssysteme im Rahmen einer Layoutplanung in neuen oder bestehenden Produktionsgebäuden bestmöglich anzurichten. Ziel der Layoutplanung ist die anforderungsgerechte räumliche Anordnung aller Planungsobjekte (Gebäude, Maschinen, Fördertechnik, Medienversorgung).

Die Layoutgestaltung umfasst die funktionelle Gesamtgestaltung, d. h. die optimale Anordnung und Gliederung der Einheiten hauptsächlich aus Sicht des Produktionsablaufs und des Materialflusses. Hierher gehören auch die gegenseitige Abstimmung der Fabrikationsprozesse, des Transportwesens und der Lagerbewirtschaftung. (in Anlehnung an Agteleky 1987, S. 46)

Um den steigenden Anforderungen an die Layoutplanung gerecht zu werden, erarbeiten Bracht et al. (2017) einen kombinierten Ansatz aus mathematischer Anordnungsoptimierung für die Double-Row-Facility-Layout-Problematik (DRFLP) und Materialflusssimulation (Abb. 2.14).

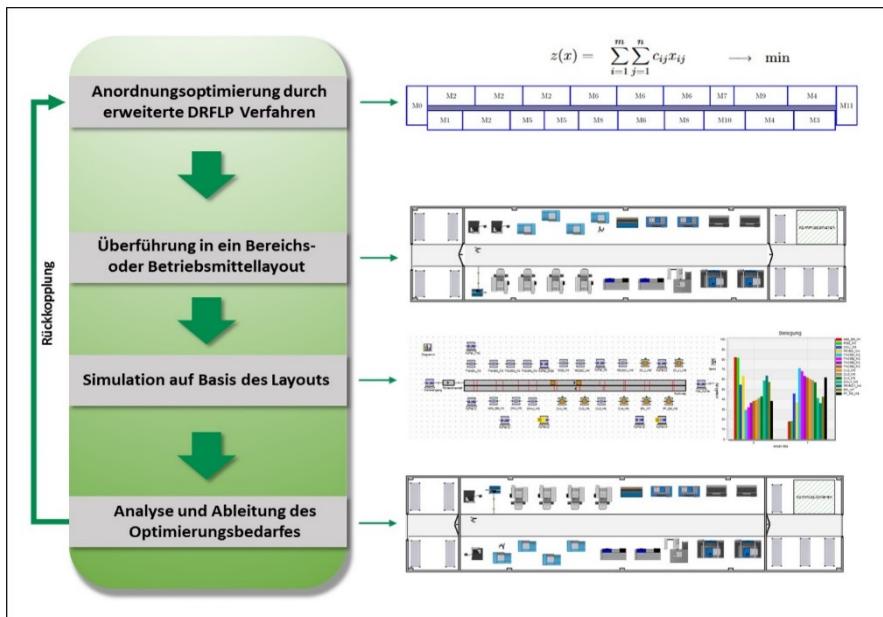


Abb. 2.14 Ablauf einer kombinierten mathematischen und simulationsgestützten Maschinenanordnungsoptimierung

Die Ablaufschleife wird solange durchlaufen, bis ein praxistaugliches, durch die Simulation abgesichertes Ergebnis des erweiterten mathematischen Verfahrens zur Layoutanordnung erreicht ist.

Für die Belange der Fabrikplanung ist es zumeist ausreichend, die Objekte in ihrer wesentlichen äußereren Geometrien abzubilden. Dabei sind Konstruktionsdetails einzelner Baugruppen an Maschinen nicht dazustellen. Insbesondere für die digitale Planung eines Layouts ist diese Redukti-

on der Informationen sinnvoll, um das Modell noch in einer akzeptablen Zeit laden, bearbeiten und speichern zu können.

Mittels einer 3D-CAD Layoutplanung kann eine Kollisionsfreiheit der Planungsobjekte erreicht werden. Eine 3D-Visualisierung dient der Visualisierung der Planungsergebnisse (Abb. 2.15), als Kommunikationsplattform für alle Planungsbeteiligten sowie zur Präsentation der Ergebnisse (vgl. auch Sontag 2014).



Abb. 2.15 Beispiel für ein Produktionslayout in einem mittleren Unternehmen

Neben der reinen Layoutplanung können die Ergebnisse auch für verschiedene weitere Planungen genutzt werden (vgl. Kapitel 7).

2.3 Logistikplanung

Die Unternehmenslogistik umfasst die ganzheitliche Planung, Durchführung, Steuerung und Kontrolle aller unternehmensinternen und übergreifenden Güter- und Informationsflüsse. Die Logistik stellt für Gesamt- und Teilsysteme in Unternehmen, Konzernen, Netzwerken und Virtuellen Unternehmen kunden- und prozessorientierte Lösungen bereit. Dabei unterscheidet man zwischen Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslo-

gistik. Als Grundfunktionen gelten transportieren, lagern, kommissionieren und verpacken.

Logistik ist die wissenschaftliche Lehre der Planung, Gestaltung, Steuerung und Kontrolle der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in oder zwischen Unternehmen sowie in Unternehmensnetzen (in Anlehnung an Jünemann 1989).

Der Aufwand, der für die Logistik notwendig ist, hängt stark vom Produkt ab. Generell steigt der Aufwand mit zunehmender Variantenanzahl und Komplexität der gefertigten Produkte. Zudem sind Versorgungsstrategien wie Just-In-Time oder Just-In-Sequence mit einem höheren Logistikaufwand verbunden. Im Sinne einer Gesamtoptimierung ist eine geschickte Abstimmung zwischen den Aufgaben der Montage und der Logistik erforderlich.

Am Beispiel der Logistikplanung in der Montage eines Automobilherstellers soll aufgezeigt werden, wie mit den Werkzeugen der DF bereits viele Anforderungen der Logistikplanung erreicht werden können. Entlang der gesamten Planungskette (siehe Abb. 2.16) unterstützen verschiedene Werkzeuge den Planer.



Abb. 2.16 Beispielhafte Prozessschritte zur digitalen Logistikplanung für eine Automilmontage (Bracht und Rooks 2008)

Ein übergreifender Planungsprozess sowie eine gemeinsame Planungsplattform und ein durchgängiges Datenmanagement sind dabei Voraussetzung zur Erschließung neuer Vorteile bezüglich der gesamten Wertschöpfungskette (Bracht et al. 2008c).

Ziel der Montageplanung eines Automobilherstellers ist die zuverlässige Sicherstellung der Versorgung der Fahrzeugmontage (Bracht und Lüddeke 2013). Vorgelagerte Planungsschritte wie die Bündelung von Teilen

mit gleichen Geometrien und Prozessen zu sogenannten Teilefamilien sowie die Festlegung der dazugehörigen Ladungsträger inklusive deren Inhaltsabschätzung (vgl. auch Abb. 2.19) bilden die Grundlage für die weitere Planung der Versorgungskonzepte.

Zur effizienten Planung nutzen die Planer hier eine Softwarebibliothek, in der Standardmodule für die Planungsobjekte Prozess und Ressourcen (Betriebsmittel) hinterlegt sind. Zudem finden sich dort verbindliche arbeitswirtschaftliche Vorgaben in Form von Referenzbausteinen. Im Rahmen der nachfolgenden Layoutplanung gilt es, eine räumlich möglichst günstige Anordnung der Materialflussbeziehungen – im Idealfall die kostenminimale Anordnung – zu finden (Arnold und Furmans 2009). Dazu werden ausgehend vom Bereitstellungsort, der sich durch die Bandabtaktung der Montage ergibt, den Prozessstationen Flächen im Layout zugewiesen. Intelligente Flächenobjekte stellen dabei eine Verknüpfung der Logistikstationen und zugehörigen Prozessstationen sicher.

Zur Absicherung dieser Gesamtplanung ist die Untersuchung des zeitdynamischen Verhaltens mittels Ablaufsimulation (vgl. Abschnitt 4.6.3) unverzichtbar. Eine rein statische Betrachtung mit Mittelwerten erlaubt keine Berücksichtigung stochastischer Einflussgrößen, wie z. B. Störungen einzelner Anlagen oder Transportmittel.

Die heutigen Anforderungen an die Logistikplanung erfordern den gleichzeitigen Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge, die aufeinander abgestimmt werden müssen. In diesem Zusammenhang wird in Analogie zur DF auch der Begriff Digitale Logistik verwendet. Diese bezeichnet nach Kuhn und Wenzel (2004) die für die durchgängige Planung und Bewirtschaftung von Logistikanlagen und -netzen notwendige infrastrukturelle Informations- und Kommunikationsbasis einer interdisziplinären Zusammenarbeit im Unternehmen über mehrere Organisationseinheiten und sogar über Unternehmensgrenzen hinweg. Eine intelligente Visualisierung von Engpassproblemen der Materiallogistik und ein mobiles Logistikmanagement auf Basis von Social Media werden in Zukunft hier bessere Unterstützung bieten (Bracht und Hinrichs-Stark 2015; Bracht und Lüdecke 2015).

Des Weiteren zeichnet sich in der Automobilindustrie aufgrund der häufigen Planungen ein Trend zur teilautomatisierten rechnergestützten Simulationsmodellgenerierung ab. Rooks (2009) zeigt in seiner Dissertation eine dementsprechende Lösung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung am Beispiel einer Fahrzeugneutypplanung.

2.4 Produktions- und logistikgerechte Produktgestaltung

Ein Ziel der Produktentwicklung ist eine fertigungsgerechte Produktplanung, wobei durch deren frühe Einbeziehung in den Entwicklungsprozess, der Nutzung von Erfahrung aus der Serienfertigung sowie durch intensivierte Zusammenarbeit aller Beteiligten Fehler möglichst vermieden oder zu einem frühen Zeitpunkt erkannt werden können.

„Die Produktentwicklung verkörpert den planerischen, gestalterischen und organisatorischen Anteil der Produktentstehung. Konkret kann sie in die Einzelschritte Produktplanung, Produktkonstruktion einschließlich Produktionsvorbereitung und Produkterprobung gegliedert werden.“ (Spur 2002, S. 69)

Ein digitales Produkt (vgl. Abschnitt 1.2.2) ermöglicht eine Planungsabsicherung entlang des gesamten Produktentwicklungsprozesses. In frühen Phasen können beispielsweise die Baubarkeit überprüft oder Aussagen zu den späteren Herstellungskosten getroffen werden. Diese Erkenntnisse lassen sich nutzen, um möglichst frühzeitig einen hohen Reifegrad des Produktes zu erreichen.

Der PEP (PEP – Produktentstehungsprozess) beantwortet die Fragen nach dem Produktaufbau, dem Prozess und der zur Herstellung notwendigen Ressourcen (Abb. 2.17). Das Produkt ist die physische Realisierung der Planung. Im Prozess wird festgelegt, welche Fertigungsschritte das Produkt durchlaufen soll. Dazu bedarf es der Planung und Absicherung der einzelnen Fertigungsschritte. Unter Ressourcen sind die notwendigen Produktionsmittel zur Durchführung der einzelnen Fertigungsschritte zu verstehen. Dazu gehört die Betriebsmittelplanung und -beschaffung sowie die Planung der gesamten Fabrik.

Diese drei Bereiche dürfen jedoch nicht getrennt voneinander geplant werden, da die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems das übergeordnete Ziel darstellt (Menges 2004). Die Aufgabe der DF ist die integrierte Planung von Produkt, Prozess und Ressource. Dazu bedarf es geeigneter Methoden, die verschiedene Planungsbereiche miteinander verknüpfen. Als Beispiel für eine solche Verknüpfung ist die Vernetzung von Fertigungs- und Logistikplanung in Abbildung 2.17 dargestellt. Im PEP werden verschiedene Meilensteine der Planung festgelegt. Diese Meilensteine dienen dazu, die Planungen der einzelnen Gewerke bzw. Bereiche aufeinander abzustimmen. Damit soll die Zusammenarbeit intensiviert und Iterations- sowie Änderungsschleifen im Planungsprozess möglichst klein gehalten werden.

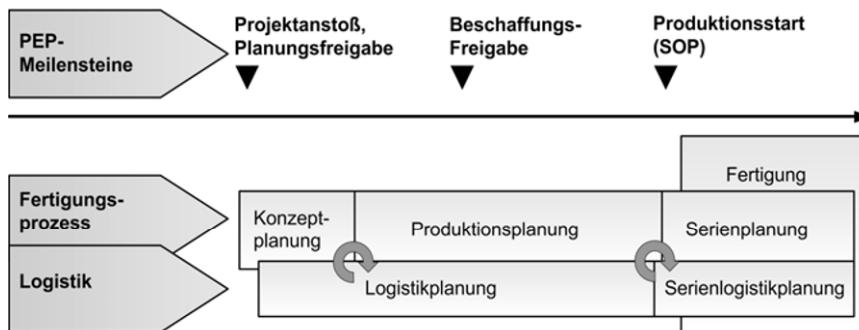


Abb. 2.17 Integration von Produktions- und Logistikplanung über den PEP am Beispiel der Automobilproduktion (Bierwirth 2004, S. 28)

Eine verstärkte Vernetzung von Entwicklung und Produktion soll zukünftig eine produktionsgerechte Produktgestaltung durch eine intensive Zusammenarbeit auf einer gemeinsamen Informations- und Datenbasis fördern (vgl. auch Huber 2016). Dazu sollen die Erfahrungen und das Wissen aus dem laufenden Betrieb gesammelt, aufbereitet und für zukünftige Planungen zur Verfügung gestellt werden. Dieser Informationsfluss verbessert die Planungsqualität sowie die produktionsgerechte Produktentwicklung. Dieses Vorgehen zeigt das Beispiel aus der Automobilindustrie in der Abbildung 2.18.



Abb. 2.18 Vernetzung von Entwicklung und Produktion (in Anlehnung an Mantwill 2007)

Eine erfolgreiche Produktbeeinflussung durch die Logistikplanung zeigt das folgende Beispiel aus der Automobilindustrie. Bereits in einer frühen Planungsphase konnten durch das vorliegende digitale Fahrzeugmodell mit allen Außenhautteilen der Karosserie sogenannte Packversuche durchge-

führt werden. Diese liefern wichtige Informationen für die anschließenden Planungen wie z. B. die Logistikplanung. Die für die Logistik benötigte Bereitstellungsfläche in der Produktion hängt wesentlich vom Behälterbefüllungsgrad ab. Durch die in Abbildung 2.19 dargestellte Untersuchung konnte eine wesentliche Verbesserung erreicht werden.

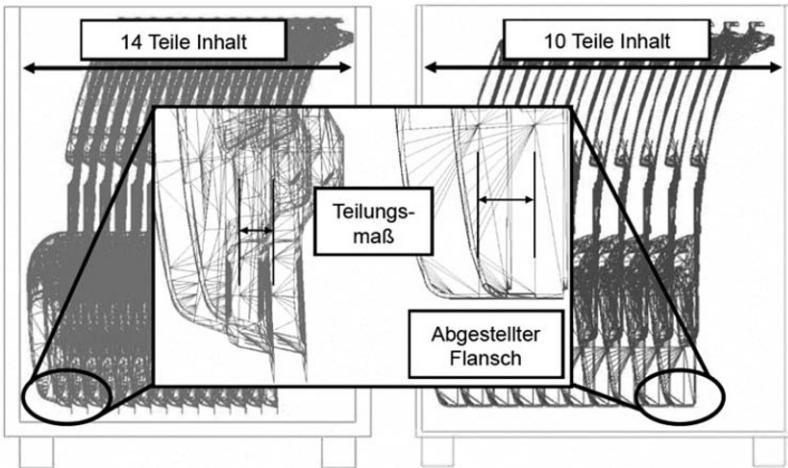


Abb. 2.19 Verringerung der Bereitstellflächen durch konstruktive Änderungen an der Frontklappe eines Pkw (Bracht und Bierwirth 2003, S. 221)

Im virtuellen Packversuch dieser Pkw-Frontklappe musste aufgrund eines abgestellten Flansches der Teileabstand ursprünglich so groß sein, dass ein Behälter nur zehn Teile fassen konnte. Eine Änderung am Produkt verbesserte die Stapelfähigkeit, so dass der Behälter nun 14 Teile aufnehmen kann. Diese konstruktive Änderung am ursprünglich geplanten Produkt ermöglichte eine deutliche Reduzierung der Logistikfläche sowie des Logistikaufwands.

Die Optimierung von Behältermanagement-Prozessen mithilfe moderner digitaler, vernetzter Technologien stellen Bracht und Sydow (2016) vor.

2.5 Anlagenanlauf und -betrieb

Eine möglichst schnelle und reibungslose Umsetzung aller Planungsergebnisse in die Realität ist das gemeinsame Ziel der Produkt- und Produktionsentstehung. Dies wird heute erschwert durch die separate Planung einzelner Anlagenkomponenten (Abb. 2.20).

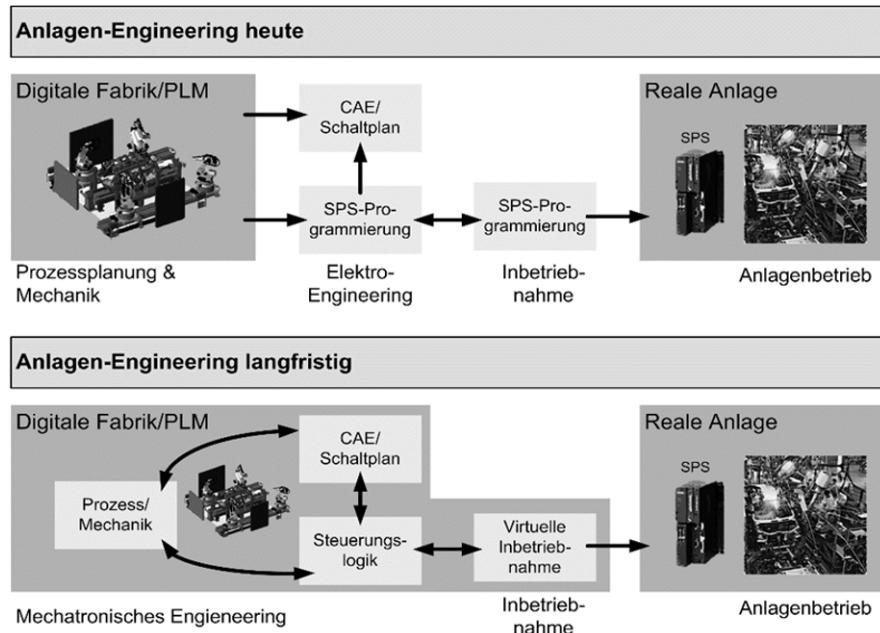


Abb. 2.20 Anlagen-Engineering heute und zukünftig (Legende: CAE – Computer Aided Engineering; PLM – Product Lifecycle Management; SPS – Speicherprogrammierbare Steuerung) (Schlögl 2007, S. 10)

Auf Grundlage der Ergebnisse der Prozessplanung und der mechanischen Konstruktion werden die Schaltpläne der einzelnen Anlagenkomponenten sowie die SPS-Programmierung (SPS – Speicherprogrammierbare Steuerung) in Spezialprogrammen erstellt. Insbesondere die SPS-Logik kann nur in der realen Anlage überprüft werden. Durch die Integration dieser Planungen in die DF können im digitalen Modell das Zusammenspiel von Anlagenmechanik, Schaltplänen und realer SPS durch eine virtuelle Inbetriebnahme überprüft werden (Sauer et al. 2010). Dieses Vorgehen sichert die Planung und Produktion schon frühzeitig digital ab und ermöglicht ein durchgängiges mechatronisches Engineering, so dass der erste Auftrag in der virtuellen Welt weitgehend fehlerfrei mit der realen Steuerung abläuft (siehe auch Abschnitt 7.5).

Für den Betrieb einer Anlage ergeben sich durch die digitale Planung und Absicherung unbestrittene Vorteile. Das Wissen und die Erkenntnisse aus der digitalen Erprobung können eine höhere Prozessreife und -stabilität bewirken. Jedoch ist es nicht möglich und sicherlich auch nicht wirtschaftlich, einen Prozess digital soweit abzusichern, dass in der Realität keinerlei Probleme auftreten.

Es ist jedoch unbedingt wichtig für weitere Planungen sowie zur Umplanung und Weiterentwicklung eines bestehenden Prozesses, das Wissen und die Erkenntnisse aus der realen Fabrik in das digitale Modell zurückfließen zu lassen (vgl. auch Huber 2016). Nur wenn die DF auch den aktuellen Stand der realen Fabrik abbildet, kann diese ständig abgesichert weiterentwickelt werden (vgl. Kapitel 7).

2.6 Die Digitale Fabrik als Basis der Industrie 4.0 - Produktion

Laut Standpunkt der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) und Bauernhansl et al. (2016) ist der Kern der vierten industriellen Revolution das Internet der Dinge und die neuen Möglichkeiten, Ressourcen Dienste und Menschen in der Produktion auf Basis Cyberphysischer Systeme in Echtzeit zu vernetzen. Nicht die Digitalisierung sei also das Revolutionäre, sondern die Möglichkeiten der Vernetzung technischer Systeme in Echtzeit sowie die Kommunikation und Datenhaltung per Internet-Technologien sowie die exponentielle Steigerung der Rechenleistung.

Die DF ermöglicht schon seit längerer Zeit durch 3D-basierende Simulationssoftware die erforderlichen Visualisierungen und Validierungen von Produktionsaufgaben und Prozessen (vgl. auch Beesten 2012). Das Neuartige ist jedoch: Um die Konzepte und Technologien von Industrie 4.0 zu erproben und abzusichern, müssen virtuelle Fabriken und Anlagenmodelle jetzt noch genauere und aktuellere Abbilder der realen Produktionssysteme sein, insbesondere nicht nur geometrisch und kinematisch, sondern auch in Bezug auf das logische Verhalten und die Steuerung der Fertigungseinheiten (Kerkenberg 2016). Sie können damit zum sogenannten Digitalen Schatten oder einen Digitalen Zwilling werden (CENIT 2016).

Der Digitale Schatten ist dabei das hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Entwicklung, der Produktion und den angrenzenden Bereichen „mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertung aller relevanten Daten zu schaffen“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23). „Der Digitale Zwilling kann darauf aufbauend durch ein Prozessmodell und Simulation ein möglichst identisches, dynamisches Abbild der Realität liefern“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23).

Der Nutzen von Industrie 4.0 liegt in hochflexiblen und wandlungsfähigen Wertschöpfungssystemen. Durch eine intelligente Fertigung können im Bereich der individualisierten Produktion Kosten entscheidend reduziert werden. Diese sogenannte smarte Produktion bewirkt den Wechsel

von starren Automatisierungsstraßen zu roboterbasierten Systemen und kooperierenden, flexiblen und agilen Automatisierungslösungen, die auch kleine Losgrößen effizient herstellen.

Hier kann die DF mit ihren Planungswerkzeugen zur Modellierung, Simulation und Programmierung – z. B. bei roboterbasierten Anwendungen, wo ein manuelles Teach-in nicht mehr darstellbar ist – ein grundlegender Wegbereiter für Industrie 4.0-Lösungen bei komplexen Anwendungen sein. Des Weiteren kann bereits die DF „smart“ werden, wenn alle Komponenten im virtuellen Fertigungsprozess genauso untereinander kommunizieren – quasi virtuell in Betrieb genommen werden, wie sie es zukünftig in der realen Umgebung tun würden.

Dieses Netzwerk der Komponenten, das Internet der Dinge, als Herzstück von Industrie 4.0 könnte so bereits virtuell zu schlagen beginnen.

3 Nutzen der Digitalen Fabrik

Der Kostenvorteil des Einsatzes der Methoden und Werkzeuge der DF für ein Unternehmen ist wie bei anderen ganzheitlichen Konzepten nur schwer zu ermitteln, da sich mehrere Einflüsse zu einer Gesamtwirkung zusammenfügen. Neben den quantifizierbaren Anteilen ergeben sich eine Reihe von qualitativen Verbesserungen. Somit stellt sich das Problem der Bewertung von strategischen Aspekten sowie der zusätzlichen Verbesserungen der realen Fabrik oder im Planungsprozess. Die folgende Nutzenbetrachtung soll daher im Wesentlichen qualitativ aufzeigen, wo die DF Vorteile bietet und wie diese zusammenwirken (Abb. 3.1).

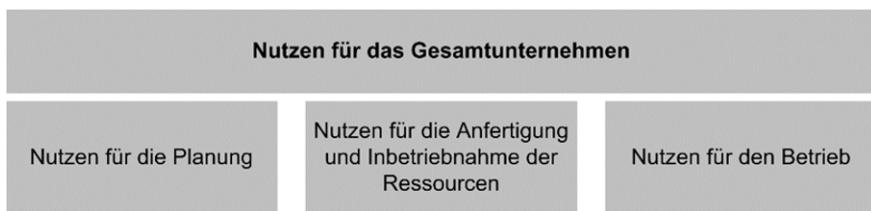


Abb. 3.1 Nutzenaspekte der Digitalen Fabrik

Dieses Kapitel beginnt mit einer gesamtunternehmerischen Sicht auf die Vorteile der DF hinsichtlich einer schnelleren Produkteinführung bei verbesserter Produktqualität, geringeren Produktionskosten sowie einer zukunftsorientierten Gestaltung der gesamten Produktionsstätte.

Kapitel 3.2 beschreibt den Nutzen im operativen Planungsprozess eines neuen Produktionsstandortes, bei der Einplanung eines neuen Produktes in ein bestehendes Produktions- und Logistiksystem, der produktionsbeeinflussten Gestaltung neuer Produkte sowie der Planung einer neuen Fertigungstechnologie. Parallel wird dargestellt, wie strukturelle Verbesserungen in der Planung erzielt werden.

Den Übergang von der digitalen Planung zur Herstellung, Beschaffung und Inbetriebnahme der Ressourcen beschreibt Kapitel 3.3.

Kapitel 3.4 stellt die Auswirkungen der DF auf die Betriebsphase dar und beschreibt, wie sie die Aufgaben der Produktion und Logistik unterstützt.

Zum Abschluss zeigt Kapitel 3.5 eine Zusammenfassung qualitativer Angaben zu den verschiedenen Nutzenpotenzialen. Dies geschieht unter dem Vorbehalt, dass die Angaben branchen- und unternehmensbezogen jeweils unterschiedlich zu betrachten sind.

3.1 Nutzen für das Gesamtunternehmen

Die vielfältigen Methoden und Werkzeuge der DF zeigen ihre Wirkung in besonderer Weise, wenn sie durch eine gesamtheitliche Organisation der Nutzung und abgestimmte Prozesse konsequent zusammenspielen können. Aus diesem Grund beginnt die Nutzendarstellung mit einer gesamtunternehmerischen Betrachtung, die zeigt, wie die Marktvoorteile einer schnelleren Produkteinführung und eine Verbesserung der Produktqualität durch die Umsetzung der DF genutzt werden können.

Es handelt sich nach (Westkämper 2011) um „diejenigen Werkzeuge, welche geeignet erscheinen, die ansteigenden Kosten von Entwicklung und Produktion einzudämmen und insgesamt die Fähigkeit zur Herstellung kundenspezifischer Systemlösungen zu stärken“.

Die durchgängige digitale Planung ermöglicht darüber hinausgehend eine Senkung der Produktionskosten und eine zukunftsorientierte Verbesserung der Produktionsstätte.

3.1.1 Marktvoorteile durch schnellere Produkteinführung

Eine Verkürzung der Planungszeit und ein schnellerer Produktionsanlauf ermöglichen eine signifikante Beschleunigung der Markteinführung neuer Produkte (Fleischer et al. 2005). Je früher ein Produkt in den Markt eingeführt wird, desto besser kann sich das Unternehmen strategisch in diesem Marktsegment positionieren. Vor allem bei innovativen Fabrikaten kommt hinzu, dass zum Zeitpunkt der Produkteinführung die Zahlungsbereitschaft der Kunden für ein derartiges Produkt häufig größer ist als nach seiner Etablierung und sich somit höhere Gewinne erzielen lassen. Umgekehrt bedeutet eine Verspätung der Lieferfähigkeit nach Produktankündigung einen Marktanteilsverlust bei gleichzeitig sinkenden Margen.

Kürzere Entwicklungszeiten ermöglichen auch kürzere Innovationszyklen. Ein Unternehmen wird dadurch befähigt, neue Produkte in kürzeren Abständen auf den Markt zu bringen. Dies sichert eine vorteilhafte Positi-

on gegenüber Wettbewerbern am Markt und ist ein wesentlicher Beitrag zur Innovationsführerschaft.

Das *Simultaneous Engineering* (Abb. 3.2) bezeichnet in diesem Zusammenhang die gemeinsame, zeitlich parallele Entwicklung eines Produktes und der dafür benötigten Produktionsanlage. Durch die Überlappung dieser beiden Schritte verkürzt sich die gesamte Zeitdauer bis zur Markteinführung der neuen Produktidee. Das Produkt kann schon in der Konzeptionsphase produktionsgerecht gestaltet werden, was sich später u. a. vorteilhaft auf die Produktionszeiten, die Investitionen, die Herstellbarkeit und die ergonomischen Bedingungen während der Produktlaufzeit auswirkt.

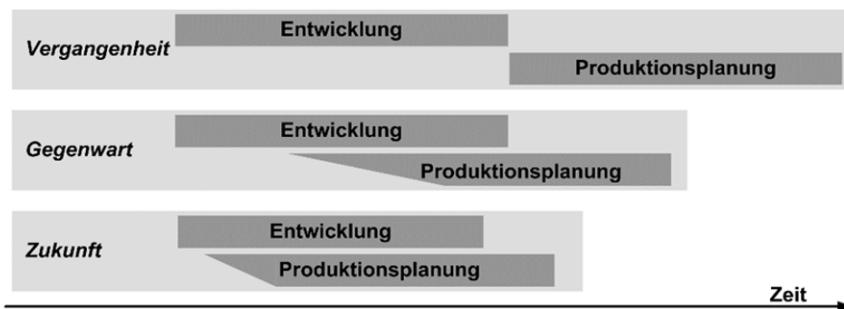


Abb. 3.2 Zunehmende Parallelisierung von Entwicklung und Produktionsplanung durch Simultaneous Engineering

Da die Produktentwicklung heute mit CAD-Daten arbeitet, stützt sich diese Zusammenarbeit zwischen Entwicklung und Planung auf digitale Datenmodelle. Der Bedarf der Anfertigung realer Prototypen reduziert sich ebenso wie die Erstellung normgerecht bemaßter technischer Zeichnungen, die nach konventionellen Planungsmethoden die Planungsgrundlage waren. Auch speziell für die Planung gebaute Funktionsmodelle entfallen oder entstehen erst später.

Damit wird die Fähigkeit, CAD-Daten zu bearbeiten und mit den Werkzeugen der DF zu verbinden, unverzichtbar, um das Simultaneous Engineering effektiv anzuwenden.

Für den Nutzen der DF bedeutet dies, dass alle Prozessschritte des Simultaneous Engineering in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieses Ansatzes mit einbezogen werden müssen. Dazu gehören alle Funktionen zur Bewertung der Herstellbarkeit des Produktes sowie zur Bewertung der Fertigungszeiten und Produktionskosten.

Die Aufwandsverschiebung in die frühe Planungsphase, das sogenannte *Frontloading* (Abb. 3.3), ermöglicht die aufwandsarme Erstellung und Bewertung mehrerer Varianten. Die intensivierte Zusammenarbeit aller Planungsbeteiligten über geeignete Kommunikations- und Informationsplattformen vermeidet redundante Planungen und vermindert den Änderungsaufwand durch das frühzeitige Entdecken von Fehlern.

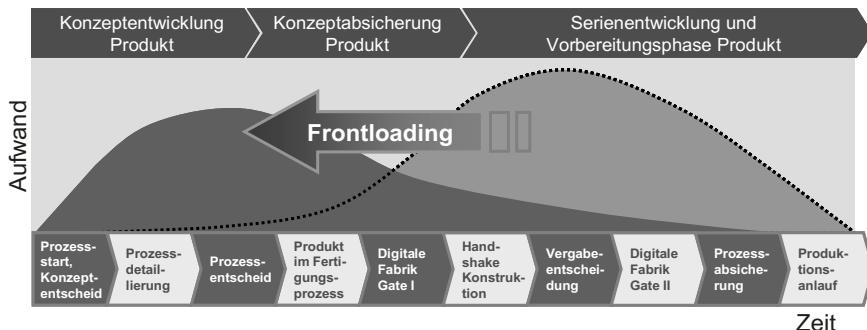


Abb. 3.3 Frontloading durch den Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik (Quelle: Volkswagen AG)

So können zu einem frühen Zeitpunkt der Planung Abschätzungen der Fertigungszeiten und -kosten erfolgen sowie optionale Fertigungsprozesse miteinander verglichen werden. Auch macht der höhere Reifegrad der Produkte zu früheren Planungszeitpunkten relevante und kritische Aspekte schneller sichtbar und bewertbar (Westkämper et al. 2003).

Der in Abbildung 3.3 dargestellte Planungsprozess der Volkswagen AG stellt die DF in zwei Phasen besonders in den Fokus des Projektgeschehens. Beim DF Gate I wird die wirtschaftliche Herstellbarkeit des Produktes mithilfe Digitaler Methoden überprüft und bestätigt. Beim DF Gate II wird die Herstellbarkeit der Fabrik und der Fertigungseinrichtungen auf Basis der Untersuchungen der DF bestätigt.

Insbesondere die Produktion profitiert von der durch die DF erreichten besseren Planungsqualität. Abbildung 3.4 zeigt, welche Potenziale durch einen konsequenten Einsatz digitaler Planungsmethoden während der gesamten Planungsphase erschlossen werden können. Die Darstellung stellt die Kosten und Erlöse über den gesamten Produktlebenszyklus für die Planung mit und ohne die Methoden und Werkzeuge der DF dar.

Durch die Möglichkeiten des Simultaneous Engineering werden zeitlich nachfolgende Planungsbereiche schon aktiv, bevor die Planungen der vorangegangenen Bereiche abgeschlossen sind. Der für alle Beteiligten erzielbare bessere Informationsstand ermöglicht eine beschleunigte und

gleichzeitig fertigungsgerechtere Produktentwicklung. Eine wichtige Voraussetzung für die parallele Planung ist die Möglichkeit, große Datenmengen zu verarbeiten und die einzelnen Planungsergebnisse verständlich zu einem Gesamtplanungsstand zusammenzuführen.

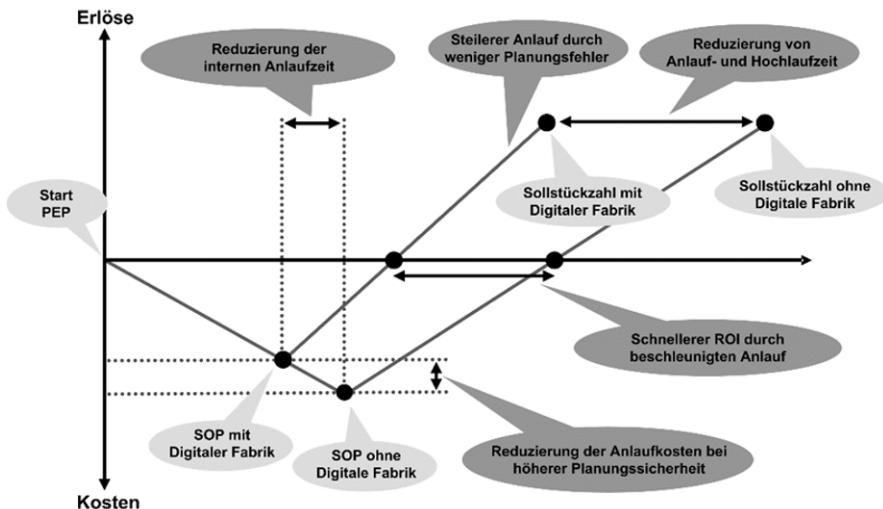


Abb. 3.4 Zeitlicher Verlauf von Kosten und Erlösen mit Werkzeugen der Digitalen Fabrik (Legende: PEP – Produktenstehungsprozess; SOP – Start of Production; ROI – Return on Investment) (Bierschenk 2005, S. 39)

Insgesamt führt der Einsatz der Methoden und Werkzeuge der DF zu einer nachhaltigen Reduzierung des Gesamtaufwandes. Zudem steigen Planungsqualität und Akzeptanz der Ergebnisse durch die realitätsnahen Darstellungen und interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Die vorweggenommene digitale Erprobung ermöglicht die schnellere Umsetzung störungssamer „robuster“ Produktionsprozesse und sorgt für einen steileren Hochlauf der Produktionsanlagen (Fleischer et al. 2005; Spath und Lentes 2008). Ein störungsfreier Anlauf als Folge einer hohen Planungsqualität verringert merklich den Ressourceneinsatz für Nacharbeit und Störungsbeseitigung in der Produktion. Zudem können MitarbeiterInnen an digitalen Modellen geschult und frühzeitig auf die veränderten Arbeitsinhalte und -abläufe vorbereitet werden. Diese Potenziale erschließen sich bei regelmäßiger Planung und setzen geeignete, strukturierte Prozesse und Abläufe voraus (Gausemeier und Stollt 2006).

3.1.2 Verbesserung der Produktqualität

Ein weiteres Ziel der DF ist es, schon im Planungsprozess eine abgesicherte Produktqualität zu erreichen. Über die gesamte Prozesskette ist der Ablauf der CAD-gestützten Entwicklung der Konstruktion mit den Daten der DF verzahnt. Wie in Abbildung 3.5 schematisch angedeutet, geht im Projektablauf jedem realen Umsetzungsschritt am Produkt oder in der Produktion eine Phase der Absicherung und Verbesserung des jeweiligen Ergebnisses mit virtuellen Techniken voraus.

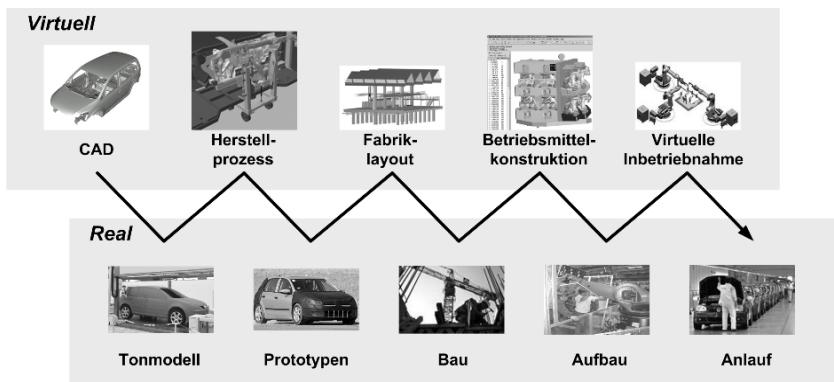


Abb. 3.5 Verzahnung virtueller Entwicklungs- oder Planungsschritte mit der realen Umsetzung (Quelle: Volkswagen AG)

Die Absicherung nutzt hierzu das breite Spektrum der Möglichkeiten der DF. Mittels der Visualisierung werden Ergebnisse für alle Projektbeteiligten unmittelbar anschaulich. Numerische Bewertungen unterstützen eine sorgfältige Analyse, und Simulationstechniken erlauben zusätzlich, den aktuellen Entwurfsstand hinsichtlich dynamischer Kriterien zu überprüfen. So können mit vergleichsweise geringem Aufwand zahlreiche Lösungen der Produktauslegung, der Fertigungsprozesse und der Fertigungsressourcen betrachtet werden, da sich die digitalen Daten schnell und kostengünstig modifizieren lassen. Im Vergleich zu realen Modellen und Prototypen können auf diese Weise in wesentlich kürzerer Zeit mehrere Iterationsschleifen zur Produktverbesserung durchlaufen werden. Dies bewirkt einen höheren Reifegrad der Produkte, Produktionsprozesse und Produktionsressourcen in allen Projektabschnitten und führt letztendlich zu besseren Produkten.

3.1.3 Senkung der Produktionskosten

Für die Gestaltung von Produktionsprozessen steht heute eine breite Palette an Strategien und Methoden zur Verfügung, die im Verbund eingesetzt zu verbesserten Fertigungs-, Rüst-, Logistik- oder Wartungszeiten führen. Erfahrungen aus vielen Projekten machen deutlich, dass diese mit den Methoden und Werkzeugen der DF effektiv geplant und verbessert werden können.

Abbildung 3.6 zeigt schematisch, dass die Möglichkeiten einer wirkungsvollen Kostenbeeinflussung besonders in der frühen Projektphase liegen. Dies gilt auch für Fertigungszeiten.

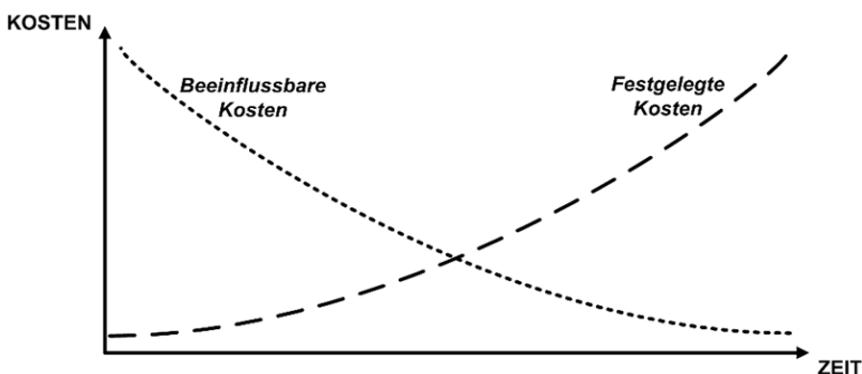


Abb. 3.6 Beeinflussbare und festgelegte Kosten in einem Entwicklungsprojekt

Eine schnelle Auslieferung an die Kunden sowie ein geringer Lagerbestand werden ganz wesentlich durch die Durchlaufzeit eines einzelnen Produktes durch den gesamten Produktionsprozess bestimmt. Die Durchlaufzeit kann beispielsweise mit Simulationen auf der Basis von Fertigungskennzahlen unter Berücksichtigung dynamischer Zusammenhänge ermittelt werden. Eine Verbesserung der Durchlaufzeit kann dadurch erreicht werden, dass variable Größen der Produktion wie Lagergrößen, Transportstrecken oder parallele Arbeitsplätze in ihren Parametern im Simulationsmodell variiert werden. Eine besondere Herausforderung besteht darin, bei der Vielzahl von möglichen Parameterwerten eine möglichst optimale Lösung zu finden. Eine Schwierigkeit besteht darin, überhaupt ein Optimum zu definieren. Neben den Herstellkosten und der Durchlaufzeit sind zunehmend auch weiche Ziele, wie z. B. Wandlungsfähigkeit und Kommunikationsfreundlichkeit, zu berücksichtigen. Es ist daher notwendig, für die von den Planungsbeteiligten als ideal bewertete Lösung durch ein längeres Wechselspiel aus Veränderung von Parametern und simulati-

ver Bewertung eine geeignete Ausführung der Produktionssysteme zu finden.

Neben den Lohnkosten gehen in die Herstellkosten vor allem die Materialkosten, die Personalkosten die Abschreibungen für die Investitionen, die Wartungskosten, die Kosten für die Instandhaltung und die Energiekosten (Müller et al. 2017) ein. Je nach Fertigungsart verteilen sich diese Kostenanteile unterschiedlich, so dass für jede Fertigung ein eigenes Kostenminimum zu finden ist. Mittels der Methoden und Werkzeuge der DF ist der Planer auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten in der Lage, die Kosten vergleichsweise rasch zu bestimmen. Dabei können ähnlich wie bei der Verbesserung der Durchlaufzeiten die Fertigungskosten in einzelnen Iterationsschritten ermittelt und ggf. gesenkt werden.

Über die gesamtheitliche Kostenbetrachtung hinaus können auch einzelne Kostenanteile berechnet werden. Hierzu gehören die Kosten für bestimmte Teilprozesse, die sich z. B. mit der optimalen Gestaltung von Rohmaterialien bei der Reduzierung von Ersatzteillagern befassen.

Die Reduktion von Kostenanteilen mit Methoden und Werkzeugen der DF wird allerdings nicht nur im Rahmen einer Anlagenneuplanung unterstützt, sondern ist ebenfalls bei Anpassungen an veränderte Produktionsverhältnisse, bei der Änderung einzelner Fertigungsabschnitte, bei den Planungsaufgaben im Rahmen von Produktänderungen sowie im Rahmen des KVP (KVP – Kontinuierlicher Verbesserungsprozess) nützlich.

3.1.4 Verbesserung der Produktionsstätte

Neben der Planung einzelner Technologien lassen sich mit den Methoden und Werkzeugen der DF auch ganze Fabrikkonzepte untersuchen. Soll etwa ein Fabrikmodell unter dem Flexibilitätsaspekt, d. h. beispielsweise unter Berücksichtigung eines sich verändernden Auftragsaufkommens, konzipiert werden, so können verschiedene Belastungsszenarien und speziell die entsprechenden Umrüst- und Umbauvorgänge untersucht werden. Daraus lassen sich dann direkte Empfehlungen für eine flexible Fabrik ableiten oder in einem aktuellen Projekt verwenden.

Ähnliche Untersuchungen sind auch unter dem Gesichtspunkt der Umsetzung einer mobilen Fabrik möglich. Bei dieser können in kurzer Zeit Maschinen und Anlagen an einen anderen Fertigungsstandort verbracht werden. Dies bietet den Vorteil, mit Kundennähe, in günstiger Logistikanbindung oder mit niedrigen Lohnkosten zu produzieren. Um dieses Konzept vorzubereiten, kann eine digitale Bibliothek wiederverwendbarer grafischer Anlagenbausteine so aufgebaut werden, dass alle in ihr enthaltenen Anlagen und Fertigungsabschnitte in Container passen. Erfahrungen zeigen, dass

durch solche Vorgaben nicht nur eine hohe Mobilität, sondern auch ein schneller Aufbau und eine hohe Flexibilität der Produktion erreicht werden.

Wirth et. al (2012) beschreiben, dass hierfür eine neue Generation von Werkzeugmaschinen auf einer Zellstruktur basiert und wandlungsfähige, mobile, rekonfigurierbare und kompatible Module besitzt. Die Methoden und Werkzeuge der DF zeigen ihren Nutzen hier nicht nur darin, dass derartige Konzepte hinsichtlich ihrer Machbarkeit, Regeln und Bedingungen einmalig überprüft werden können. Mit der Möglichkeit, die Anlagenkomponenten in die Bibliotheken der Systeme der DF einzufügen, lassen sich diese Konzepte abgesichert und umfassend in aktuellen Planungsprojekten wiederverwenden.

Ein weiterer Nutzenaspekt ergibt sich im Zusammenspiel mit Industrie 4.0. „Aus dem Internet wird das „Internet der Dinge“, aus den iPad das „iProductionPad“ und aus dem Laserdrucker der „3D-Drucker“ (Reinhart und Bauernhansl 2015). Damit sind „in der Fabrik von morgen Bauteile, Produkte und Maschinen komplett miteinander vernetzt“ (Fecht 2015). Diese Vernetzung wird zur „Datenerfassung, Auswertung, Wartung, Überwachung und Bedienung“ (Gül 2015) wird erst dann richtig wirkungsvoll, wenn sie sowohl in den smarten Komponenten als auch den mobilen Endgeräten eingesetzt wird.

3.2 Nutzen für die Planung

Neben den gesamtunternehmerischen Effekten der Verkürzung der Entwicklungszeit, der Steigerung der Produktqualität sowie der Verringerung der Produktionskosten eröffnen die Methoden und Werkzeuge der DF auch deutliche Verbesserungen für die Produktionsplanung. Hierbei entstehen sowohl kurzfristig Effekte wie die Verringerung von Planungskosten einzelner Projekte als auch langfristige wirksame Verbesserungen, die sich zum Beispiel auf die Veränderungen der Planungsmethode, der Kommunikation und der Voraussetzungen für ein effizientes Wissensmanagement beziehen.

3.2.1 Ganzheitliche Planung und neue Planungsprozesse

Die Kernsysteme der DF gewährleisten die gleichzeitige grafische und numerische Bearbeitung von Produkt, Prozess und Ressourcen. Daneben unterstützen zahlreiche Softwarewerkzeuge beispielsweise die Simulation

einzelner Arbeitsfolgen oder ganzer Materialflussketten, die Detailgestaltung des Hallenlayouts oder auch die Konstruktion von Betriebsmitteln.

Diese Vielfalt erlaubt es einem einzelnen Planer oder einer Gruppe, im Team mehrere Aspekte der aktuellen Planungsaufgaben simultan zu bearbeiten. So können z. B. sowohl der geplante Fertigungsprozess, die erforderliche Investition als auch der Platz- und Energiebedarf in der Fertigung in einem einzigen Arbeitsgang gemeinsam gestaltet werden. Bei dieser Arbeitsweise werden Abhängigkeiten der verschiedenen Parameter untereinander effizient berücksichtigt.

In Kombination mit den dazugehörigen Möglichkeiten der kinematischen 3D-Visualisierung und der Nutzung von Simulationsergebnissen ergibt sich für den Planer ein wesentlich erweiterter Horizont bei der Durchführung seiner Aufgaben und seine Entscheidungen werden damit auf eine breitere Basis gestellt.

Zur Verdeutlichung nennt (Halm 2015) die Möglichkeit, Zusammenhänge „die im Zweidimensionalen verborgen bleiben, erst in der dreidimensionalen Ansicht zu erschließen – beispielsweise die Frage, ob man von einem bestimmten Standort aus alle Notausgänge sehen kann oder ob ein Gabelstapler unter Krananlagen hindurchpasst.“

Da die digital unterstützen Tätigkeiten nicht auf die zeit- und kostenintensive Erstellung realer Modelle und Prototypen angewiesen sind, können sie wesentlich früher im Projekt erfolgen als bei einer konventionellen Bearbeitung. Im Zuge einer Vorverlegung von Planungsschritten ändern sich die zeitlichen Relationen der einzelnen Planungsschritte untereinander zum Teil erheblich.

Um die Entscheidungen abzusichern, können sie im Planungsprozess mit sogenannten digitalen Meilensteinen festgemacht werden. Zu den entsprechenden Terminen werden vor der Freigabe einer neuen Phase im realen Projektgeschehen alle zur Verfügung stehenden digitalen Daten des aktuellen Projektstandes gemeinsam auf ihre durchgängige Plausibilität geprüft. Auf dieser Grundlage können die nachfolgenden Projektschritte mit höherer Ergebnisqualität durchgeführt werden.

Die Suche nach Best-Practice-Lösungen im Unternehmen sowie deren Implementierung als verbindliche Standards ermöglichen die Ausschöpfung erheblicher Potenziale. Durch ein standardisiertes Vorgehen in Planungsprozessen können die Abläufe beschleunigt, Fehler vermieden und die Wirtschaftlichkeit erhöht werden (Bracht und Masurat 2006b). Das Ergebnis ist ein effektiver Workflow (Westkämper et al. 2003), welcher beispielsweise auch eine schnellere Einarbeitung von MitarbeiterInnen durch die transparente und gut dokumentierte Arbeitsstruktur unterstützt.

Durch die Nutzung digitaler Daten und Werkzeuge werden die Planer auch in die Lage versetzt, ihre Ergebnisse in neuer Form an die Folgepla-

nungen zu übergeben. So können die Steuerungen von Robotern, NC-Maschinen (NC – Numerical Control) und der Handhabungstechnik schon mit den Programmen der DF offline programmiert werden. Die Aussagekraft von Ausschreibungsunterlagen erhöht sich durch die ergänzende Bereitstellung digitaler Modelle. Schulungsunterlagen erhalten durch Animationsfilme eine neue Eindeutigkeit und pädagogische Qualität.

In Summe führen sowohl die Elemente der ganzheitlichen Planung, die vorgezogenen digitalen Planungsaktivitäten, die virtuellen Abnahmen und Meilensteine, die neuen Planungsstandards wie auch die neuen Formen der Datenverarbeitung dazu, dass die Prozesse der Planung neu gestaltet und ausgerichtet werden müssen. Erst in einem solchen angepassten Prozessrahmen kommen dann die Methoden und Werkzeuge der DF effizient und effektiv zum Einsatz.

3.2.2 Verbesserung von Planungsschritten

Durch die Rechnerunterstützung in der Planung entstehen unbestrittene Nutzenpotenziale nicht nur für den Gesamtprozess, sondern auch konkret bei den Tätigkeiten einzelner Planer. Diese lassen sich in drei Bereiche einteilen (Meierlohr 2003):

- Routinetätigkeiten, z. B. Suche und Aufbereitung von Daten
Unter Routinetätigkeiten soll hier die Wiederholung gleicher Vorgangsfolgen verstanden werden.
- Gestaltende Tätigkeiten für Einzelemente
Gestaltende Tätigkeiten sind gekennzeichnet durch Kreativität. Daher ist eine Standardisierung dieser Vorgänge nur schwer möglich und erscheint auch wenig sinnvoll. Jedoch kann der Planer bei der Entscheidungsfindung durch die Nutzung von hinterlegten Methoden oder Wissensdatenbanken unterstützt werden.
- Funktionen zur Bewertung und Analyse von Ergebnissen
Bei der Bewertung der Güte eines Layoutentwurfes können Softwarewerkzeuge helfen, Daten zu ermitteln, aufzubereiten und zu interpretieren.

Betrachtet man die verschiedenen Tätigkeitsarten eines Planers im Planungsverlauf einer Automobilfabrik (Abb. 3.7), wird deutlich, dass er einen Großteil seiner Zeit für die Informationsbeschaffung und Abstimmung verwendet. Eine Entlastung des Planers von diesen Tätigkeiten gibt ihm mehr Freiraum für die gestaltenden und bewertenden Tätigkeiten.

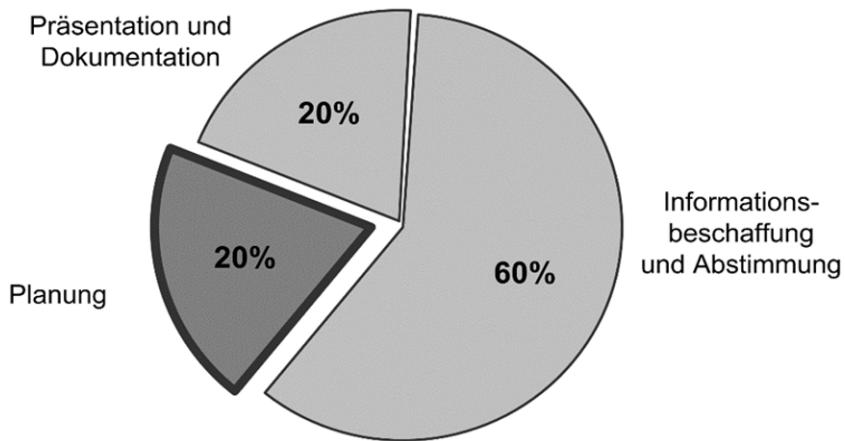


Abb. 3.7 Tätigkeitsaufteilung eines Planers in der Automobilproduktion (Bracht 2002b)

Die Werkzeuge der DF beeinflussen aber nicht alle Zeitanteile im Planungsprozess (Abb. 3.8). Allgemeines Suchen nach Fachwissen, Regeln, Normen, Planungsprämissen oder weiteren Fragen unterstützen die Werkzeuge der DF nur indirekt. Jedoch leistet die DF einen Beitrag im Verbund mit Internet-Suchmaschinen und internen Wissensdatenbanken.

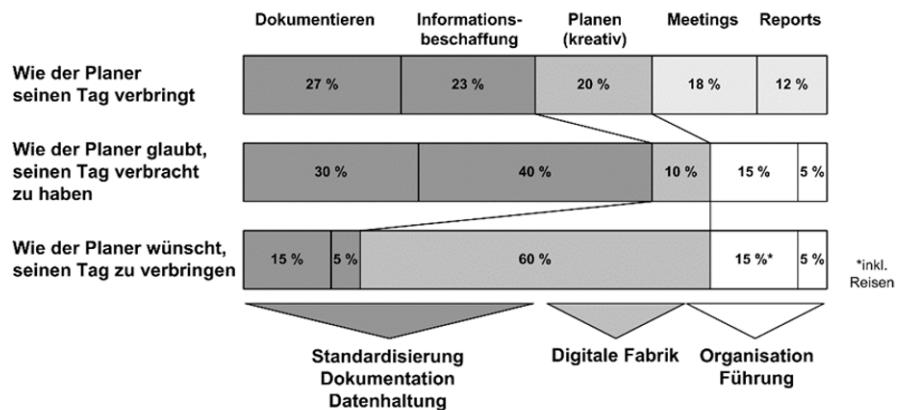


Abb. 3.8 Zeitanteile im Planungsprozess (Marczinski 2005)

Abgestimmte Planungswerkzeuge und -methoden sichern die Kompatibilität und Weiterverwendung von Daten und Informationen. Somit kann in kürzerer Zeit die Planung mehrerer Varianten erfolgen (Marczinski

2004). Dazu muss das Datenmanagement den verschiedenen Planungstools und den Anwendern Informationen anforderungsgerecht zur Verfügung stellen. Zudem müssen die Informationen aus dem laufenden Fabrikbetrieb in dieser Datenbank abgelegt und ausgewertet, sowie die Steuerungsdaten aus der Datenbank an die Fabrik zurückgegeben werden. Eine geeignete Kooperations- und Kommunikationsplattform wie z. B. eine VR-Großprojektion zur Visualisierung ermöglicht fachbereichsübergreifende und interdisziplinäre Planungen (Abb. 3.9).

Am digitalen Modell können Änderungen am Produkt oder Produktionsprozess zunächst geprüft werden. Dies ermöglicht eine frühzeitige Nutzenbewertung verschiedener Handlungsalternativen, ohne diese in der Realität testen zu müssen (Horn 2005b). Zudem reduziert die Erprobung an digitalen Produktmodellen die Anzahl der physischen Prototypen.

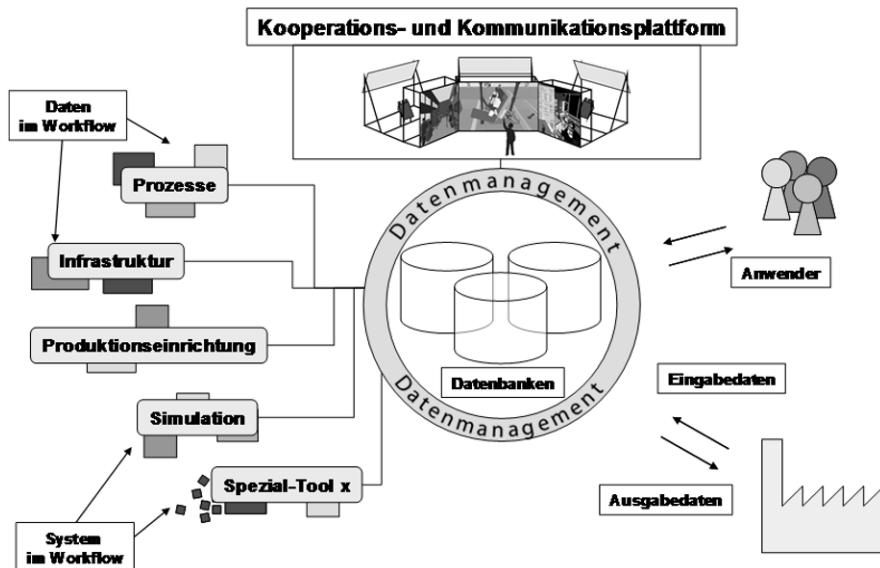


Abb. 3.9 Verbindung der Daten, Prozesse, Systeme und Anwender durch ein geignetes Datenmanagement

3.2.3 Teilautomatisierung durch Assistenzsysteme und Workflowmanagementsysteme

Wie Erfahrungen bei der Optimierung von Text- und CAD-Systemen zeigen, können einzelne Prozessketten durch Workflowmanagementsysteme

und Assistenzsysteme noch weiter verkürzt werden. Diese Zusätze befinden sich für die Werkzeuge der DF zurzeit noch in der Konzeption und Entwicklung. Eine konsequente Anwendung ist aber auch für den Planungsbereich notwendig, um auch diese zusätzlichen Potenziale der Prozessverbesserung auszuschöpfen (Scheffler 2009).

Insbesondere erschließen sich große Nutzenpotenziale durch die Datenintegration über die traditionellen Schnittstellen der verschiedenen Unternehmensbereiche hinweg. Erschwert wird die benötigte Durchgängigkeit der Planung jedoch durch die bestehende Aufbauorganisation und fehlende gemeinsame Standards. Im Laufe der letzten Jahrzehnte haben sich in den Bereichen Produkt-, Prozess- und Ressourcenplanung zwar jeweils eigene Standards entwickelt und etabliert, welche die eigenen Aufgaben bestmöglich unterstützen sollen. Zur integrierten Planung sind jedoch durchgängige Standards über alle Planungsstufen und Gewerke hinweg notwendig (Menges 2005).

Eine Automatisierung von Planungsaufgaben durch standardisierte Planungsabläufe sowie eine durchgängige Datenbasis erleichtert beispielsweise die Auswahl von Schweißzangen im Automobilbau sowie die Kollisions- und Zugänglichkeitsbetrachtungen in Gebäuden (Westkämper et al. 2003).

Bei einer Teilautomatisierung der Planungsprozesse ist zu beachten, dass die Planung von Produktionsanlagen und Fabriken ein kreativer Prozess ist, der kontinuierlich an neue Herausforderungen angepasst werden muss. Daher sollten nur solche Prozessabschnitte teilautomatisiert werden, die ständige und nichtkreative Routineaufgaben enthalten. Hierzu gehören u. a. administrative Tätigkeiten, Aufgaben zur Dokumentation oder die Erstellung von Berichten. Wendet man diese Regel konsequent an, entsteht durch Rationalisierung der Routine mehr Freiraum für kreative Aufgaben.

Die Durchgängigkeit der Planung hängt im Wesentlichen von einer geeigneten Datenstruktur von Produkt, Prozess und Ressource ab. Zur Planung der Fertigungsstruktur, wie beispielsweise dem Festlegen der Fügefolge einer Baugruppe, gewährleistet die Übernahme der Produktstrukturdaten die Vollständigkeit und Richtigkeit aller benötigten Informationen. Im Falle von Änderungen kann dann eine überarbeitete Produktstruktur in die Planung einfließen. Ebenso sollte die Produkt- und Prozessstruktur zur Planung der Ressourcen verwendet werden (Abb. 3.10). Daher müssen das zukünftige Datenmodell sorgfältig geplant und die Schnittstellen sauber definiert werden.

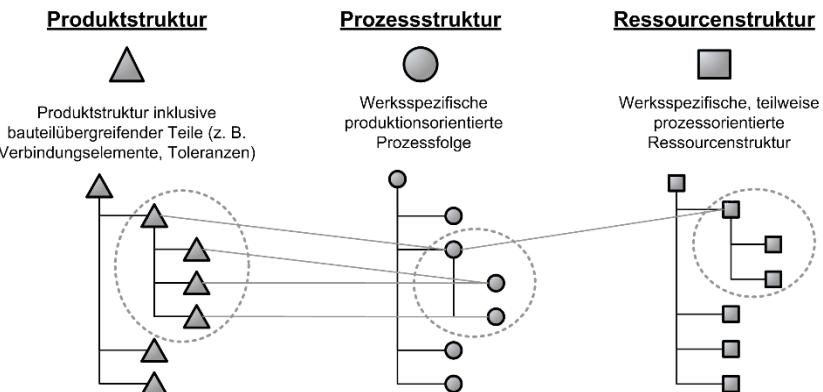


Abb. 3.10 Relevante Datenstrukturen der Digitalen Fabrik (in Anlehnung an Bär 2004)

Insgesamt wird durch die Instrumente der DF eine nachhaltige Verbesserung aller Planungsaktivitäten erreicht (Bracht und Masurat 2006b). Transparente Prozesse erleichtern die Zusammenarbeit zwischen den Planungsbeteiligten und helfen Planungsergebnisse abzusichern. Die Visualisierung des Planungsstandes, z. B. durch gemeinsame und regelmäßige VR-Sitzungen, erschließt Synergieeffekte (Abb. 3.11) durch unmittelbare und konkrete Zusammenarbeit der Fachplaner und trägt damit wesentlich zu einer höheren Planungsqualität in einer früheren Planungsphase bei (Bracht et al. 2008d).

Bei der Logistikplanung und -steuerung können Assistenzsysteme und eine bessere Kollaboration z.B. mit Social Media Anwendungen für eine erhebliche Prozessverbesserung sorgen (Lüdecke 2014; Bracht und Lüdecke 2015; Hinrichs-Stark 2016).

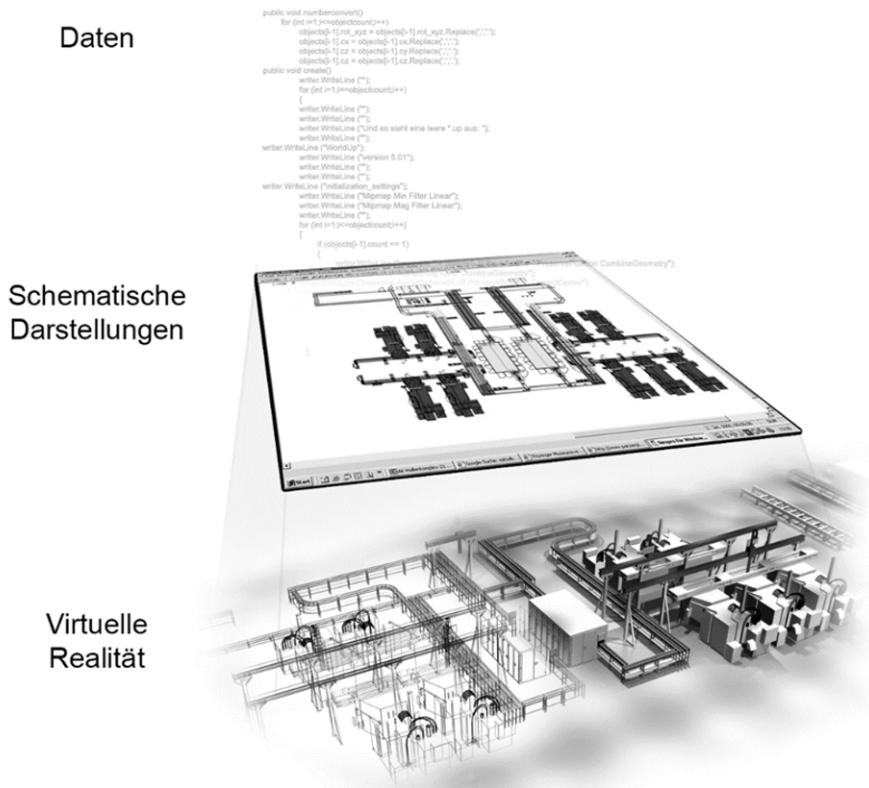


Abb. 3.11 Synergieeffekte der Digitalen Fabrik durch die simultane Nutzung verschiedener Daten und Darstellungsformate durch Fachplaner und Betroffene in virtuellen Sitzungen

Erforderliche Änderungen vorhergehender Planungsstufen aufgrund neuer Erkenntnisse in späteren Planungsphasen können einfacher vollzogen werden.

3.2.4 Reduktion des Informationstransferaufwandes

Eine weitere Verkürzung der einzelnen Planungsvorgänge ergibt sich durch die wesentlich höhere Geschwindigkeit bei dem Versand von digitalen Daten gegenüber konventionellen Dokumenten. Digitale Modelle müssen nicht verpackt und per Post versandt werden, sondern werden auf

einem zentralen Server gespeichert oder als Datenpaket verschickt und sind sofort weltweit verfügbar. Aufgrund dieser Eigenschaft können viele komplexe Teilprozessketten innerhalb des Planungsablaufes in ihrer Durchlaufzeit drastisch reduziert werden.

Die Wirkung dieses Effektes zeigte sich zum Beispiel in der Volkswagen AG deutlich bei der Versendung der Ausschreibungsunterlagen der Presswerkzeuge für den Golf A5 Anfang der 2000er Jahre. Für dieses Fahrzeug wurden die gesamten Unterlagen mitsamt allen CAD-Modellen, Zwischenkonstruktionen, Anschaungsmodellen und Spezifikationen zum ersten Mal vollständig digitalisiert versandt. Der gesamte Vorgang dauerte einen Nachmittag unter der Mitwirkung von zwei MitarbeiterInnen. Der Empfang wurde von allen Bietern bis zum nächsten Morgen bestätigt. Bei einem anderen Fahrzeugmodell, drei Monate vorher, dauerte derselbe Vorgang mit papiergestützten Unterlagen noch zwei Wochen und beschäftigte vier MitarbeiterInnen. Bei einem rückblickenden Vergleich der beiden Projekte wurde bestätigt, dass durch die durchgängige digitale Verarbeitung nicht nur die Angebotsfristen verkürzt werden konnten, sondern sich die Qualität der Gebote auch wesentlich erhöht hat.

Bei einem internationalen Projekt oder bei einer größeren Anzahl an Standorten, Lieferanten und Dienstleistern sind die Reisekosten ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Planungskosten einer neuen Fertigung. Durch die Verwendung von digitalen Modellen wird die gleichzeitige Konzeption, Analyse und Auswertung an weltweit verteilten Standorten per Video- oder Telefonkonferenz ermöglicht. Die Erfahrungen zeigen, dass diese Kostenposition durch eine konsequente Anwendung der Methoden und Werkzeuge der DF reduziert werden kann und einige Aufwendungen für die Hard- und Software allein durch die Verringerung des Reisebudgets und der Kompensation von Reisezeiten wirtschaftlich werden.

3.2.5 Stabilisierung der Projektqualität

Qualität definiert sich durch die zulässige Abweichung der Ist-Werte von Soll-Werten. Für die Planung lassen sich Soll-Werte festlegen, indem zu bestimmten Meilensteinen im Planungsprozess Reifegrade durch Checklisten definiert werden. Diese werden durch die unterschiedlichen Daten aus der DF ausgewertet und lassen sich dadurch nachvollziehbar messen.

So lässt sich erkennen, ob zum Zeitpunkt der Konzeptabnahme der Produktionssystemplanung für ein neues Produkt für jedes neue Teil ein genehmigtes Anlagenmodell vorliegt (Abb. 3.12). In der gleichen Weise kann geprüft werden, ob für alle Fertigungsbereiche das Layout in einer virtuellen Begehung abgenommen und ob für alle Materialbewegungen ei-

ne Simulation durchgeführt wurde. Durch Anwendung dieser Methode auf alle digital vorliegenden Daten können eindeutige Aussagen über den aktuellen Planungsstand ermittelt und Abweichungen gegenüber den vorgedefinierten Checklisten erkannt werden.

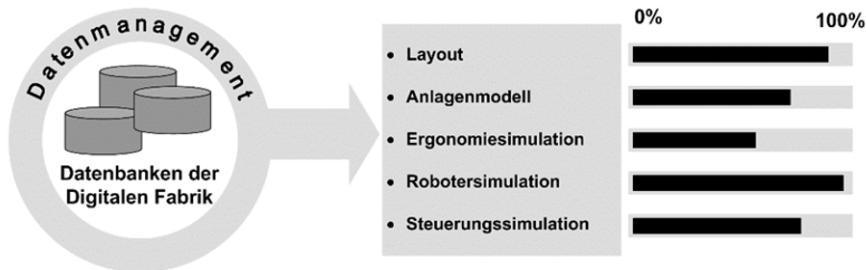


Abb. 3.12 Auswertung des Projektstandes als Reifegrad auf Basis der unterschiedlichen Daten der Digitalen Fabrik

Mit dieser Methode erhält die Projektleitung ein verlässliches Instrument, um den Projektfortschritt sichtbar zu machen und offene Punkte zu finden. Damit ist die Projektbewertung nicht mehr von den individuellen Einschätzungen der Projektbeteiligten und aktuellen Tagesproblemen abhängig. Durch eine Auswertung des vollständigen aktuellen Planungsstandes lassen sich oft Lücken auffinden, die sonst nicht erkannt werden, und entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung ableiten.

3.2.6 Bereitstellung von Planungsinformationen und -wissen

Die Integration der Daten über ein gemeinsames Datenmanagement stellt ein wichtiges Kriterium für ihre durchgängige Nutzung dar. Erst die Austauschbarkeit und Weiterverwendung der Planungsdaten ermöglicht eine beschleunigte Planung beispielweise durch das Simultaneous Engineering. Ein durchgängiges Datenmanagement stellt den Anwendern die benötigten Informationen aktuell und anforderungsgerecht zur Verfügung (Abb. 3.13). Die DF wird damit zu einem wesentlichen Bestandteil des Wissensmanagements in einer Planung.

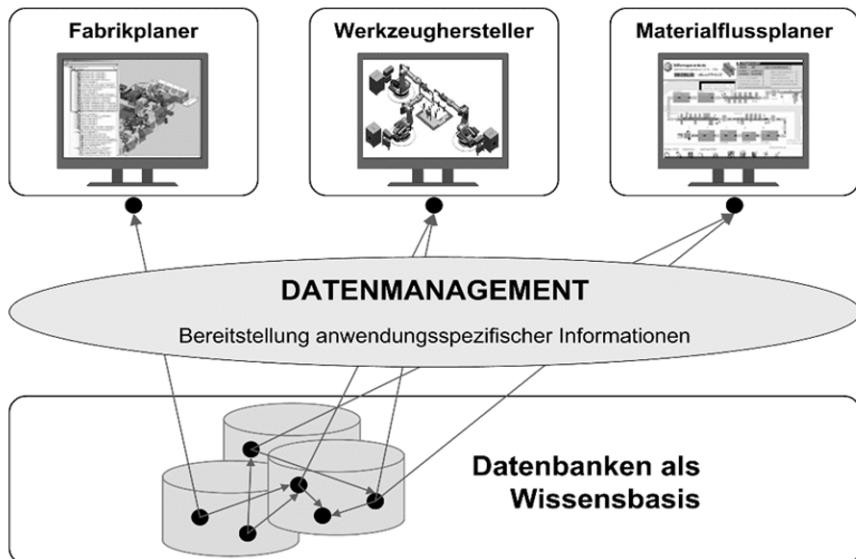


Abb. 3.13 Ideale anwendungsspezifische Informationsbereitstellung

Mit der Schaffung einer zentralen einheitlichen, aktuellen und redundanzfreien Datenbasis stehen konsistente Informationen als Planungsgrundlage für alle Planungsbeteiligten bereit. Durch eine übergreifende und interdisziplinäre Zusammenarbeit in einer vernetzten Systemlandschaft stehen in früheren Planungsphasen mehr Informationen zur Verfügung (Horn 2005b).

Ergänzend ermöglichen eine Standardisierung der Planungsobjekte und die Erfassung und Verwaltung, z. B. von Musteranlagen, in geeigneten Softwarebibliotheken die Wieder- und Weiterverwendung von vorhandenen Lösungen (vgl. auch Bracht, Gorke, Spiess 2015b). Damit können beispielsweise im Bereich der Fabrik- und Layoutplanung in kürzerer Zeit verschiedene Varianten entwickelt und die Ergebnisqualität erhöht werden.

Die Nutzung von Datenbanken als Wissensbasis unterstützt den Planer durch zusätzliche Informationen und sichert die Vollständigkeit der Angaben zu einem Planungsobjekt. Hierzu zeigt Dörrer (2000) eine wissensbasierte Evaluierung zukünftiger Produktionsstrategien insbesondere mit der Methode System Dynamics auf.

Zudem kann der Planer schon in einer frühen Planungsphase sein Augenmerk auf die späteren Kosten richten, wenn die Planungsobjekte aus der Bibliothek mit Kostensätzen hinterlegt sind. Jedoch gilt es zu beachten, dass Bibliotheken nur dann einen Nutzen für den Planer haben, wenn ihr Inhalt aktualisiert und gepflegt wird. Unter dieser Voraussetzung schafft

die zunehmende Standardisierung der Planung eine einfache Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Planungsalternativen und Ergebnissen (Westkämper et al. 2003; Zäh und Schack 2006).

Wissen wird heute als wichtiges Element des Kapitals eines Unternehmens betrachtet. Im Planungsbereich liegen die Schwerpunkte

- auf dem Erfahrungswissen älterer MitarbeiterInnen, das diese an jüngere Kolleginnen und Kollegen weitergeben,
- auf dem aus einzelnen Planungsvorhaben gewonnenen Projektwissen,
- auf dem aktuellen Forschungswissen sowie
- auf den Ergebnissen von Benchmarks und Analysen.

Die Methoden und Werkzeuge der DF haben in diesen Prozessen zwei wesentliche Aufgaben zum Wissenserwerb: Zum einen wird in den verwendeten Softwarebibliotheken das Planungs-Know-how der erfahrenen MitarbeiterInnen gesammelt; Projekterfahrungen und neue Technologien führen damit zur Verbesserung und Erweiterung der Softwarebibliotheken. Zum anderen wird die Wissensgewinnung auf Basis der strukturiert vorliegenden und abrufbaren Daten unterstützt.

Ein weiterer Wissensbereich umfasst die fertigungsgerechten Konstruktionsvorgaben, die von der Entwicklungsabteilung genutzt werden können. Auch diese Vorgaben lassen sich in Form von digitalen Modellen aufbereiten und können von den Konstrukteuren direkt in den CAD-Systemen eingesehen werden.

Nur in wenigen Fällen sind zwei geplante Fabriken soweit identisch, dass eine ganze Fabrik als sinnvolle Referenz verwendet werden kann. Daher ist es zweckmäßiger, die Vorlage in Module aufzuteilen und diese bei einem neuen Planungsfall entsprechend zu kombinieren. Strukturiert man diese Module zu einer systematischen Sammlung, erhält man eine Bibliothek, die die Effizienz der Planung noch einmal steigert (Abb. 3.14).

So kann ein Standardarbeitsplatz mit Arbeitsflächen, Lagerflächen, Ablagen, Werkzeugen, Versorgungsleitungen, Abfallsortung und allen notwendigen Details von erfahrenen Planern in mehreren Varianten vorkonfiguriert werden. In derselben Weise können Logistikflächen, Sozialräume oder auch Verkehrselemente als Normelemente definiert werden. Mit einer solchen Bibliothek abgestimmter und optimierter Einzelbausteine ist auch ein noch wenig erfahrener Planer in der Lage, eine Fertigung schnell und mit hoher Qualität zu planen. So gelingt es heute an einem einzigen Tag, ein komplettes 3D-Modell für eine Karosseriebauhalle der Automobilproduktion aufzubauen. Dabei werden mehrere hundert Schweißroboter, die zahlreiche Blecheinzelteile zusammenfügen, mitsamt

Spannvorrichtungen, Fördertechnik, Stellflächen für die Materialbehälter, Schaltanlagen und Schutzzäunen berücksichtigt.

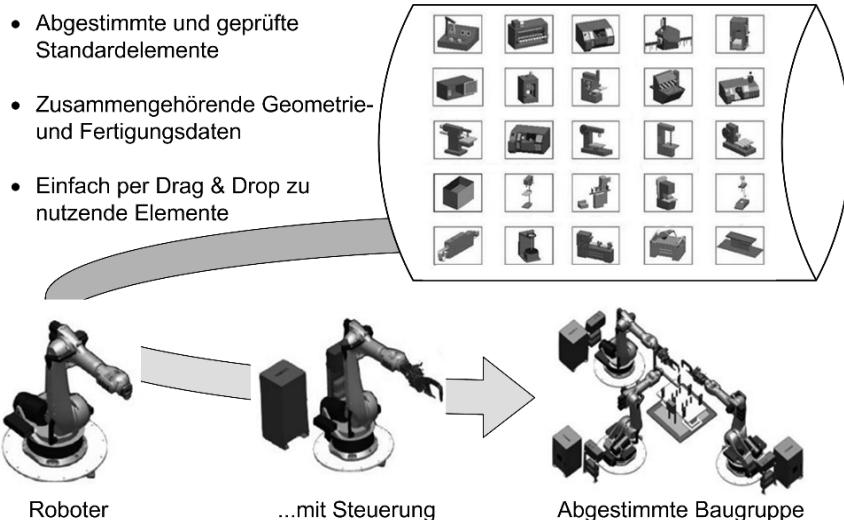


Abb. 3.14 Elemente einer Softwarebibliothek (Quelle: Volkswagen AG)

Dieses Modell einer Layoutalternative kann anschließend mit VR-Technologie visuell untersucht werden und ist die Basis für weitere Analysen wie eine Kinematiksimulation der einzelnen Roboter oder eine Bestimmung der Durchlaufzeit innerhalb der Gesamtanlage. Im Zuge des weiteren Projektfortschrittes wird dieses Modell kontinuierlich verbessert.

3.3 Nutzen für Anfertigung und Inbetriebnahme der Ressourcen

Die Daten und Modelle der DF sind im weiteren Verlauf des Produktentstehungsprozesses die Basis zur Anfertigung der Betriebsmittel und Produktionsanlagen, mit denen das geplante Produkt in Serie hergestellt werden soll.

Erfolgt die Planung der Anlagen in einem anderen Unternehmen als deren Herstellung, so wird zunächst über eine Ausschreibung ein geeigneter Hersteller ermittelt. Mit den digitalen Modellen aus der Planungsphase als Ergänzung der Ausschreibungsunterlagen kann der Lieferant sein Angebot erstellen und seine preisliche Kalkulation auf der Basis größtmöglicher Transparenz durchführen. Er kann dabei diese Modelle weiter detaillieren

und Vorschläge zur Verbesserung durch die Verwendung besonderer Techniken seines Hauses oder neuer Entwicklungen erarbeiten. Diese vom Anbieter ergänzten Modelle gehen zusammen mit den finanziellen Daten an das ausschreibende Unternehmen zurück. Der Kunde erhält so eine sehr präzise Information über den Angebotsumfang.

Die Zusammenarbeit zwischen Planungsunternehmen und Anlagenlieferant ist besonders effizient, wenn beide dieselben Softwarewerkzeuge verwenden und so die Daten auf einfache Weise ausgetauscht werden können oder wenn mit Standardschnittstellen zum Datenaustausch gearbeitet wird. Der Nutzen liegt in einer wesentlich kürzeren Angebotsphase, einer erhöhten Qualität des Liefervertrages und mündet in einer von Kunden- und Lieferantenseite gemeinsam optimierten Lösung.

Ist der Lieferant festgelegt, so bilden die digitalen Modelle das Fundament für die *Konstruktionsphase*. Die einzelnen Komponenten der Produktionseinrichtungen werden aus den vorliegenden Modellen weiter in CAD-Systemen konstruiert oder aus vorhandenen Bibliothekselementen zusammengefügt. Der Anlagenhersteller kann diese Modelle nutzen, um darüber mit Sublieferanten zu kommunizieren oder um mit dem Auftraggeber seine Realisierungsvorstellungen im Detail durchzusprechen. Auch in dieser Phase beschleunigt die Nutzung digitaler Modelle den Gesamtprozess und schafft eine höhere Transparenz und Qualität der Konstruktion.

Die anschließende Planung des *Herstellprozesses* der Fertigungsanlagen wird häufig noch mit konventionellen Prozessplanungs- und NC-Programmiersystemen durchgeführt. Im Zuge der fortschreitenden Systementwicklung entsteht aber auch bei diesen Aufgaben eine zunehmende Durchgängigkeit mit den Modellen der DF. Hierdurch können die einzelnen Teilprozesse beschleunigt und der Konvertierungsaufwand verringert werden, darüber hinaus ergeben sich weniger Übertragungs- und Verständnisfehler.

Die weiteren Schritte bei der Anfertigung der Anlagen, wie die Einplanung der Fertigungsaufträge, die Disposition der Halbzeuge und Materialien sowie die Steuerung der Produktionsanlagen selbst gehören nicht unmittelbar zum Konzept der DF, jedoch besteht auch hier das Potenzial, dass die Systeme zunehmend zusammenwachsen, wie Kapitel 2.4 zeigt.

Schon heute wird eine enge Zusammenarbeit an einigen Stellen deutlich. Die Konstrukteure sowie die Produktionsplaner der Anlagen nutzen beispielsweise die Bibliotheken der DF, um dort Konstruktions- und Herstellmerkmale der Betriebsmittel abzulegen. So beschleunigen und stabilisieren sie ihren eigenen Prozess und gewährleisten gleichzeitig einen Erfahrungsrückfluss in die Planung. Beides erhöht die Effizienz und die Qualität der Gesamtprozesse.

Ein weiterer Aspekt der Integration der Methoden und Werkzeuge der DF bei der Planung sowie der Herstellung der Betriebsmittel und Fertigungsanlagen betrifft deren Steuerungssysteme und -programme. Häufig ist es bei der Herstellung einer Fertigungsanlage nicht möglich, diese beim Hersteller testweise aufzubauen. Ursachen hierfür sind die zusätzlichen Kosten, der Zeitbedarf, mangelnder Raum bei extremen Anlagengrößen, Sicherheitsaspekte oder logistische Probleme bei der Nutzung von Erprobungsmaterialien und Anlagenkomponenten, die nicht im eigenen Hause hergestellt werden. Daher ist eine virtuelle Inbetriebnahme der Anlagen oft der einzige Weg, um die Steuerungen abzustimmen, bevor die Anlage beim Nutzer aufgebaut wird.

Hierzu werden die Steuerungen mit CAD-Systemen der Elektroplanung entwickelt und die dazugehörigen Steuerungsprogramme mit konventionellen Programmiersystemen erstellt. Durch den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme können sie anschließend im Zusammenspiel mit kinematischen Anlagenmodellen der DF erprobt und verbessert werden. Durch eine Verbindung zwischen der Steuerung und dem virtuellen Modell lassen sich die bestehenden Programme wie bei einer realen Anlage betreiben und bieten damit ein breites Feld für virtuelle Probeläufe und Optimierungsprozesse. Zusätzlich können die Steuerungsprogramme durch Offline-Programmierung erstellt und direkt auf die Steuerungen übertragen werden. Dabei wird nicht nur der eigentliche Produktionsbetrieb der Anlage simuliert, sondern auch das Verhalten der Steuerung bei Wartungstätigkeiten und definierten Störungen. So kann gewährleistet werden, dass die Anlage schon während der Planungsphase weitestgehend vorkonfiguriert wird. Somit kann durch die Kombination virtueller Anlagenmodelle und realer Steuerungen auch das Bedien- und Wartungspersonal schon vor dem realen Anlagenbau in die künftigen Arbeitsabläufe eingewiesen werden.

Insgesamt verkürzt sich die Anlaufphase durch die virtuelle Inbetriebnahme auf das Feinjustieren und das Einfügen von Änderungen. Damit wird ein steilerer Anlauf der gesamten Produktion ermöglicht. So berichtet Audi-Produktionsvorstand Waltl in (Köth und Günzel 2016), dass das Werk in Mexiko der erste Standort ist, der komplett virtuell geplant und in Betrieb genommen wurde. „Wir haben die gesamte Prozesskette optimiert und das Werk 30 Prozent schneller in Betrieb genommen als üblich.“

Eine andere Form des Zusammenspiels zwischen den digitalen Modellen und den realen Anlagen ergibt sich beim physischen Aufbau von Infrastruktur und Fertigungsanlagen in den Gebäuden. Hier besteht immer das Problem, die Anlagen, Roboter und sonstigen Einrichtungen an den richtigen Koordinaten zu platzieren und keine Messfehler zu machen. Beim Einsatz der Methoden und Werkzeuge der DF wurde für die Planung häu-

fig die Halle schon sehr genau aufgenommen, beispielsweise mit einem 3D-Laserscanner. Mit dieser Technik besteht nun auch die Möglichkeit einer bislang nicht erreichten Genauigkeit im Millimeterbereich, um die Anlagen einzumessen und schnell die richtige Lage für Bohrlöcher oder Festigungsanker im freien Raum zu finden. Hinzu kommt, dass die aufzubauenden Anlagen über mobile Bildschirme angezeigt werden können.

Die konsequente Anwendung dieser Vorgehensweise beschleunigt nicht nur den Aufbau, sondern erhöht gleichzeitig die Qualität der Montage. Die Methode des Laserscanning (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.3.3) wird auch dazu genutzt, während des Montageprozesses den Fortschritt zu prüfen und abgestimmte Korrekturmaßnahmen vorzunehmen. Dazu wird der Bau in regelmäßigen Abständen aufgenommen und mit dem geplanten Modell abgeglichen. Aufgrund von Differenzen zwischen Modell und Realität durch die Umsetzung und Änderungen während des Aufbaus werden Planabweichungen direkt vor Ort erkannt. Das Umsetzungsteam kann so geeignete Maßnahmen direkt vor Ort besprechen und weitere Projektbeteiligte anhand der aktuellen 3D-Modelle über die neue Situation informieren. Folgefehler werden damit vermieden und pragmatische Anpassungen können wirtschaftlich umgesetzt werden.

Dies geschieht besonders mit den Ansätzen der Smart Factory, bei denen der Bediener zum Bedienten wird. „Die Maschinen liefern ihm die für seine Aufgaben maßgeschneiderten Informationen zur richtigen Zeit an den richtigen Ort. Der Mitarbeiter von morgen ist Planer und Entscheider in einem komplexen Umfeld“ (Klein 2016).

3.4 Nutzen im Betrieb

Neben dem Nutzen in der Planungs- und Inbetriebnahmephase bieten die Methoden und Werkzeuge der DF auch erhebliche Nutzenpotenziale in der Betriebsphase. Nach Beginn der Produktion unterliegt eine Fabrik einem kontinuierlichen Veränderungsprozess, der durch

- Verbesserungsideen aus dem eigenen Haus,
- Anpassungen an den allgemeinen Stand der Produktionstechnik,
- Anpassungen an Produktmodifikationen und neue Produktvarianten und
- Reaktionen auf Verschiebungen in der Nachfrage am Markt

hervorgerufen wird. Bei den hierfür erforderlichen Planungstätigkeiten können dieselben Methoden genutzt werden wie in der Planungsphase. Ihr

Einsatz führt auch hier zu einer Qualitäts- und Leistungssteigerung der Planung.

Zusätzlich lassen die Daten und Methoden der DF weitere Nutzungsmöglichkeiten zu, welche über die reinen Planungszwecke hinausgehen und zu einem Zusammenwachsen der Planungssysteme und der IT-Systeme des operativen Betriebs führen. Einige Beispiele sollen diesen künftigen Trend verdeutlichen:

- **Produktionsleittechnik und Digitaler Fabrikbetrieb**

Nutzt man für die Produktionsleittechnik die Modelle der DF, die schon während der Planungsphase erstellt wurden, liegt bereits ein Abbild der geplanten Produktion vor, so dass man früher mit der Detaillierung und Realisierung der Leitstände beginnen kann. Zudem nutzt man die durchgängige Systematik gleicher grafischer Elemente, was die Kommunikation im Team und das Verständnis erhöht.

Ferner kann die Produktionsleittechnik bei zunehmender Datendurchgängigkeit die Techniken der virtuellen Inbetriebnahme nutzen, um direkt in die Steuerungen der Maschinen einzugreifen. Ziel ist es dabei, dort Zustandsdaten auszulesen oder Steuerungsbefehle an die Maschinen zu übergeben. So entsteht eine neue Technik, die sowohl für die Planung als auch die operative Steuerung genutzt werden kann. Die Entwicklung auf Basis von gemeinsamen Standards und integrierten Lösungen erspart weitere Schnittstellen und Medienbrüche.

Ein nächster Schritt ist die Rückführung von Ist-Daten der Leittechnik als Grundlage für die Parameter und Vorgaben kommender Planungen. Mit diesem Ansatz könnten zukünftig die Simulationsmodelle auf aktuellen Erfahrungsdaten aufsetzen, um so bessere Vorhersagen des Systemverhaltens zu ermöglichen.

- **Regelmäßige vorausschauende Ablaufsimulation**

Eine Fabrik wird nicht in einem kontinuierlichen Prozess betrieben, sondern unterliegt schwankender Kundennachfrage sowie Störungen und Veränderungen in Produktion und Logistik. Liegt ein Ablaufsimulationsmodell der Fabrik vor, so lässt es sich kontinuierlich mit den aktuellen Daten der Produktionsausbringung, der Lagerbestände sowie der aktuellen Kundennachfrage versorgen. Auf Basis dieser Daten ist dann eine kontinuierliche Vorschau der kommenden Produktionssituation möglich. Die Werksleitung kann täglich anhand der Prognose entscheiden, ob korrigierende Maßnahmen notwendig sind. Gleichzeitig kann die Simulation aufzeigen, ob und wenn ja, welche Auswirkungen alternative Vorschläge zur Korrektur haben (Knau 2008).

- Planung von Rüstprozessen

Bei der Planung komplexer oder sich häufig wiederholender Rüstprozesse können die digitalen Modelle ebenso einen wirtschaftlichen Nutzen bringen wie bei der Planung des Betriebes einer Produktionseinrichtung. So kann auch hier die ergonomische Belastung der Werker oder die von ihnen zurückzulegenden Wege durch Simulation verbessert werden. Werkzeuge, Bedienelemente oder zu wechselnde Vorrichtungen können optimal platziert werden, um die Dauer und die Kosten des Rüstvorgangs minimal zu halten.

- Einsatz bei der Kleinserien- und Einzelteilstiftigung

Bei Kleinserien- oder Einzelteilstiftigungen wird die Produktionsplanung meist von weniger Personen durchgeführt als bei der Planung von Großserien und Massenfertigung. Für diesen Einsatzfall sind Softwarewerkzeuge sinnvoll, die von der Produktentwicklung über die Prozessplanung, der Offline-Programmierung der Maschinen und Anlagen bis zur Steuerung der Fertigung selbst alle Prozessschritte durchgängig unterstützen, ohne dass dabei Medienbrüche auftreten. Mit dieser Integration können die Planungsprozesse verkürzt und Kosten vermieden werden. Damit ist eine sehr schnelle Reaktion auf Kundenwünsche realisierbar.

- Wartungsarbeiten und Facility Management

Eine weitere Nutzergruppe der DF ist die Instandhaltung der Produktion sowie das Facility Management für das Gebäude und die Infrastrukturseinrichtungen. Auch diese Abteilungen können anfallende Umbauten, Wartungsarbeiten und Verbesserungen digital planen sowie die Veränderungen dokumentieren, um jederzeit ein aktuelles Modell der eigenen Fabrik im Zugriff zu haben.

Noch ist es nicht üblich, die Werkzeuge der DF mit den Planungsdatenbanken der Instandhaltung zu verbinden. Sobald entsprechende Schnittstellen existieren, können Wartungspläne und Dokumentationen mit den 3D-Daten dargestellt, geplant und überprüft werden.

Mit den Visualisierungen der digitalen Modelle werden der Betriebsrat, die Instandhaltung, das Facility Management, der Gesundheitsschutz, die Werksfeuerwehr, der Umweltschutz und alle eventuell betroffenen Abteilungen des Werkes in die Lage versetzt, sich über die aktuelle Planung zu informieren. Damit werden sie auf die künftige Situation anschaulich vorbereitet und erhalten die Möglichkeit, eventuelle Anregungen zur Verbesserung in den Planungsprozess einzugeben.

- Mobile Endgeräte, Smart Apps und Cloud Computing

„Eine vielversprechende Weiterentwicklung der DF führt zur neuen „smartten“ DF. Dieser Ansatz berücksichtigt innovative, ortsunabhängigen

ge sowie modulare Methoden und Werkzeuge“ (Bracht 2013, S. 11). Er ermöglicht zum einen, die Daten und Modelle der DF vor Ort in der Fertigung zu nutzen, etwa um sich über ausgewählte Anlagen zu Nutzungs-, Ausbildungs-, Wartungs-, Instandhaltungs-, Planungs- oder Inventurzwecken zu informieren. Zum anderen bietet er das Potenzial Daten aus der Fertigung in Form von Bildern, Messdaten, Fehler- oder Problemprotokollen an die Modelle der DF anzuhängen und so Zentralstellen oder anderen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Ein dritter Anwendungsfall ist die Nutzung direkt vor Ort. Dies könnte erfolgen, um einen Soll-/Ist- Abgleich durchzuführen, Probleme zu lösen oder Planungen durchzuführen, indem Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vor Ort in der Fabrik eingebunden werden. „Dadurch können Erfahrungen und Wissen aller Beteiligten eines Systems direkt erfasst und berücksichtigt werden“ (Silcher et al. 2015, S. 20). Detaillierte Ausführungen zum Einsatz mobiler Endgeräte für die Fabrikplanung sind in Abschnitt 7.10 zu finden.

Am Ende der Nutzungsdauer einer Produktionsanlage wird diese einer neuen Nutzung zugeführt oder entsorgt. Auch bei diesen Tätigkeiten können die hinterlegten Daten eine wertvolle Unterstützung sein, um die Anlage nach den für sie gültigen Recyclingregeln zu entsorgen, die Gebäude und Einrichtungen am gleichen Ort neu zu nutzen oder an einem anderen Ort wieder zu verwenden.

3.5 Quantitative Aussagen zum Nutzen

Die quantitativen Anteile der einzelnen Nutzenaspekte unterscheiden sich stark nach der Planungsaufgabe sowie der späteren Produktion. Bei einer im Wesentlichen manuellen Fertigung wirkt sich die Reduzierung von Fertigungszeiten naturgemäß stärker aus als bei einer hochautomatisierten Fertigung. Bei letzterer haben dagegen die Reduzierung der Investitionen und der schnellere Anlauf der Anlagen ein höheres Gewicht. Trotz dieser verschiedenen Auswirkungen auf den Nutzen nennen einige Autoren Kennwerte der Einsparungen, die aber nur im Umfeld spezifischer Planungsfälle Gültigkeit haben. Abb. 3.15 zeigt das Ergebnis einer Studie im Auftrag des VDA bei deutschen OEM, in der verschiedene Anwender der DF zu den Kosteneinsparungen durch die DF befragt wurden (vgl. auch Tabelle 6.1).

Für die Reduzierung der Herstellkosten wurden in dieser Umfrage Werte von 3-5 % angegeben. Allein durch diese Einsparung wird der Einsatz von Methoden und Werkzeugen der DF bei einem Serienfertiger in hohem

Maße wirtschaftlich. Alle anderen Werte in Abb. 3.15 beziehen sich auf notwendige Investitionsprojekte, die bei einem Serienfertiger bezogen auf den Produktlebenszyklus einen kleineren Kostenanteil ausmachen. Damit bringen diese Vorteile nur einen vergleichsweise geringeren absoluten Zusatznutzen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung der DF.

Bei Planungsbüros oder den Herstellern von Betriebsmitteln und Anlagen ergibt sich eine andere Situation. Hier entfallen in der Regel die Einsparungen der Herstellkosten bei Serienproduktion, dafür wird der Umsatz dieser Unternehmen von der innovativen, schnellen, änderungsrobusten und wirtschaftlichen Durchführung von Investitionsprojekten für einen Kunden bestimmt.

Bei beiden Unternehmensformen wirkt sich aber der hohe Grad der Vermeidung von Planungsfehlern (70 %) sehr positiv aus. Diese Verbesserung sorgt nicht nur für Kostenvorteile, sondern auch für eine bessere Qualität der Planung.

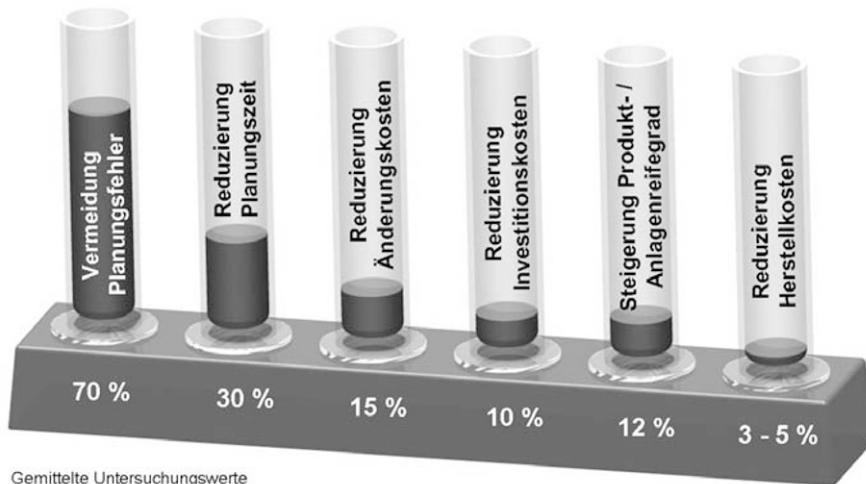


Abb. 3.15 Quantitative Angaben zur Wirtschaftlichkeit der Digitalen Fabrik (Bracht und Spillner 2009)

So stehen auch für die Engineering Firma EDAG stets Geschwindigkeit und Innovation bei gleichzeitiger Kostensenkung auf der Agenda. Dort wurde ein Drei-Stufen-Modell für vorgezogenes Anlagen-Engineering mit digitaler Abnahme entwickelt (Schäfer 2008).

Für die Daimler AG “[...] ist die Digitale Fabrik einer der wesentlichen Erfolgsfaktoren für eine effiziente, zielgerichtete Planung mit einem deutlich höheren Prozessreifegrad - Prozessqualität bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung“ (Eißrich 2005).

Quantifizierte Vorteile hinsichtlich der erreichten Kosten- und Zeiteinsparungen bei der Planung des neuen Pkw-Werks in Ungarn aufgrund dreidimensionaler Datenmodelle und simultaner Planung mithilfe der DF nennt der Produktionsvorstand Mercedes-Benz Cars, Rainer E. Schmückle: „Die Baukosten für Kecskemét liegen rund 25 bis 30 Prozent unter denen vergleichbarer Planungsprojekte – den Zeitfaktor eingerechnet. Für das ungarische Werk kalkulieren wir eine Bauzeit von zwei Jahren, das sind ein bis eineinhalb Jahre weniger als wir seinerzeit noch für den Bau des Werkes Rastatt benötigten“ (Schmückle 2010, S. 30-31).

4 Methoden und Modelle in der Digitalen Fabrik

Die DF gilt nach der diesem Buch zugrunde liegenden Definition als „der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ (VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 3). Die Verwendung dieser Definition erfordert zunächst die Präzisierung der Begriffe Modell, Methode und Werkzeug. Im Anschluss werden die typischerweise einzusetzenden Methodenklassen benannt und erläutert. Einige dieser Methoden spielen auch im Kontext von Industrie 4.0 eine wichtige Rolle. So liefern die Simulation und Visualisierung eine wesentliche Grundlage für die Verbindung von Realität und Virtualität und die Schaffung eines sogenannten Digitalen Zwillings, während beispielsweise das Monitoring die aktuellen Betriebsdaten im Sinne des Digitalen Schattens dem Anwender verdeutlicht. Im Rahmen dieses Buches ist jedoch keine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den in der Literatur vorhandenen unterschiedlichen Definitionen, Ordnungsschemata und Beschreibungen der Methoden vorgesehen. Ziele sind vielmehr die Verwendung einer den Autoren jeweils geeignet erscheinenden Definition aus der Literatur und eine möglichst umfassende, strukturierte Erläuterung der im Rahmen der DF einzusetzenden Methoden. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Beschreibung der für den EDV-Einsatz dieser Methoden notwendigen technischen Ausstattung.

4.1 Die Begriffe Modell, Methode und Werkzeug

Die Begriffe Modell, Methode und Werkzeug werden im Folgenden erläutert und in Bezug zueinander gestellt. Damit liefert dieser Abschnitt eine Grundlage für die anschließende Beschreibung der Methoden.

4.1.1 Der Modellbegriff

Unter einem *Modell* versteht man eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem

anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“ (vgl. VDI 3633 Blatt 1 2014, S. 3). Diese Definition orientiert sich an der Modelltheorie, die den Modellbegriff über das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal charakterisiert (Stachowiak 1973, S. 131 ff.). Während das Abbildungsmerkmal darauf verweist, dass Modelle stets nur Abbildungen oder auch Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale sind, die selbst wieder Modelle sein können, präzisiert das Verkürzungsmerkmal die Tatsache, dass ein Modell im Allgemeinen nicht *alle* Attribute des Originals, sondern nur die Attribute umfasst, die dem Modellbildner oder Modellnutzer relevant erscheinen. Dieses Merkmal spiegelt sich beispielsweise auch in der Forderung der Arbeitsgemeinschaft Simulation wider, die eine Modellbildung „so abstrakt wie möglich und so detailliert wie nötig“ (ASIM 1997, S. 7) fordert. Das pragmatische Merkmal genügt letztendlich dem Umstand, dass Modelle ihren Originalen nicht eindeutig zugeordnet sind, sondern nur eine Ersetzungsfunktion für bestimmte Modellnutzer, innerhalb bestimmter Zeitintervalle und für einen bestimmten Zweck haben.

Aus modelltheoretischer Sicht können sich Modelle also bei gleichem Betrachtungsgegenstand aufgrund unterschiedlicher Aufgabenstellung und intendierter Zielsetzung sowie subjektiver Betrachtung des Modellbildners und des Gültigkeitszeitraums unterscheiden. Damit steht die Forderung, eine vollständige digitale Repräsentation aller Produkte, Prozesse und Ressourcen des Produktionssystems (Hanßen und Riegler 2002) zu erreichen und die einmal entwickelten Modelle immer wieder zu verwenden, im Widerspruch zur klassischen Modelltheorie (Stachowiak 1973), die von per se nicht eindeutigen und nicht vollständigen Modellen in Abhängigkeit von Untersuchungsziel, Zweck, Modellbildner und Gültigkeitszeitraum ausgeht. Dieser Widerspruch soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, da hierdurch eine Vielzahl der heute in der DF bestehenden Probleme begründet ist und nur Modellierungskonventionen und Vorgehensmodelle, Interoperabilitätskonzepte und Standardisierungsbestrebungen diesen Widerspruch in Teilen auflösen können (Wenzel 2006).

Die einzelnen Modelle der DF beschreiben – je nach Aufgabenstellung und Untersuchungsziel unterschiedlich detailliert und formalisiert – die zu untersuchenden Betrachtungsgegenstände, d. h. die Ressourcen der Systeme, ihre Prozesse und Produkte. In die Modellbildung fließen physische Aspekte der Fabrik (Gebäude, Layout, Infrastruktur, Arbeitssysteme oder auch technische Systeme) einschließlich der produktspezifischen Eigenarten, logistischen Abläufe, technischen Prozesse sowie Informations-

und Energieflüsse, aber auch Aspekte wie Organisationsstrukturen, Geschäftsprozesse oder vorhandenes und genutztes Wissen ein.

4.1.2 Methoden und Werkzeuge

Die Vielzahl der Methoden und Werkzeuge in der DF wird je nach Autoren unterschiedlich geordnet. So unterbreiten Dombrowski und Tiedemann (2005, S. 137) einen Vorschlag, indem sie die Werkzeuge der Produktentwicklung und Produktionsplanung nach ihrem Einsatz im Produktentstehungsprozess und nach ihrem softwaretechnischen Integrationsgrad in einem Unternehmen strukturieren (siehe Abb. 4.1).

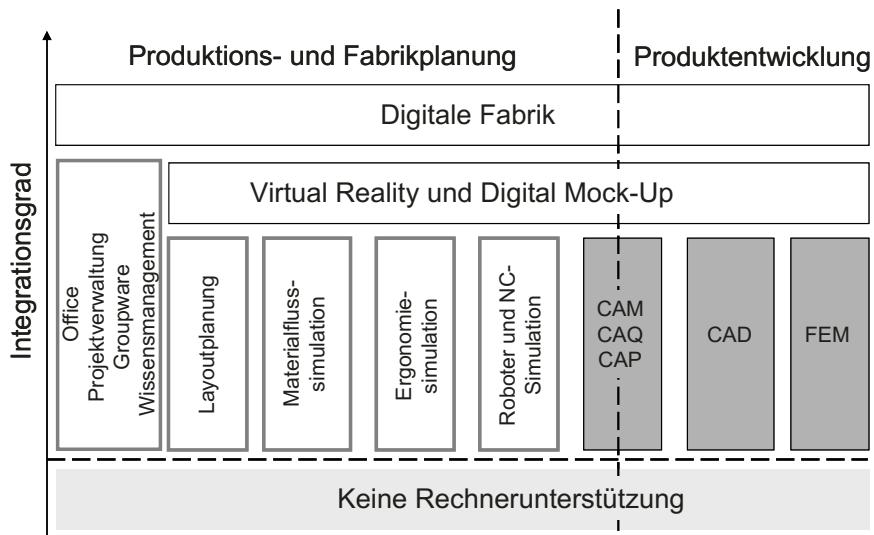


Abb. 4.1 Werkzeuge der Produktentwicklung und Produktionsplanung (Legende: CAM – Computer Aided Manufacturing; CAQ – Computer Aided Quality Assurance; CAP – Computer Aided Planning; CAD – Computer Aided Design; FEM – Finite-Element-Methode) (nach Dombrowski und Tiedemann 2005, S. 137)

Diese Strukturierung lässt allerdings die Produktion außen vor und betrachtet ebenfalls nicht die im Rahmen der DF notwendige Sicht auf die organisatorischen Abläufe, die zwangsläufig *vor* der Umsetzung der IT-Werkzeuge in den Unternehmen gestaltet werden müssen (vgl. u. a. Wenzel et al. 2005). Eine etwas umfassendere Sicht wird in Schack (2008) in Anlehnung an (Zäh und Schack 2006) sowie (Zäh et al. 2005c, S. 6) erarbeitet. Die Ordnung der Techniken der DF wird differenziert nach Me-

thoden, Werkzeugen und Bedienschnittstellen. Die Methodensicht meint in diesem Zusammenhang die Berücksichtigung von aufbau- und ablauforganisatorischen Fragestellungen im Hinblick darauf, welche Werkzeuge von welchem/r MitarbeiterIn zu welchem Zeitpunkt wie eingesetzt werden. Die Methodensicht integriert die Werkzeugsicht mit der Bedienschnittstellen-sicht. Abbildung 4.2 gibt hierzu einen Überblick.

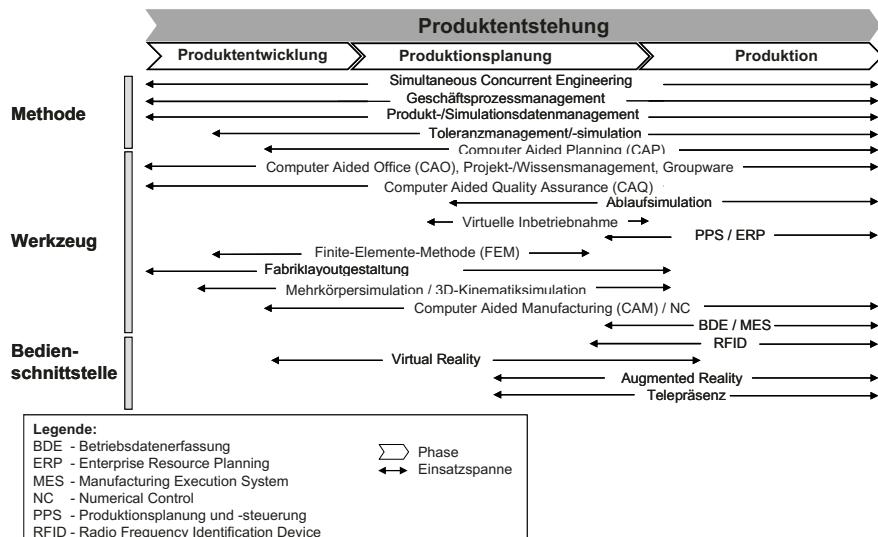


Abb. 4.2 Techniken der DF in den Phasen der Produktentstehung (in Anlehnung an Schack 2008, S. 25)

Die beiden Ordnungsschemata zeigen bereits die Vielzahl zu berücksichtigender Methoden und Werkzeuge auf; sie verdeutlichen aber auch, dass die Verwendung der Begriffe Methoden, Werkzeuge und Techniken nicht immer eindeutig erfolgt. Für die folgenden Ausführungen sollen folgende Begriffsdefinitionen in Anlehnung an die Definitionen der Informatik gewählt werden:

Eine *Methode* bezeichnet eine „systematische zielgerichtete Vorgehensweise, sowie ein durchdachtes Verfahren, welches für eine Vielzahl von Problemen zu einer sinnvollen Lösung führt.“ (Claus und Schwill 2006, s. v. Methoden der Informatik)

In der DF erfolgt die Erstellung und Anwendung der einzelnen Modelle unter Nutzung von unterschiedlichen Modellierungs-, Analyse- und Visualisierungsmethoden.

Ein IT-gestütztes *Werkzeug* (Softwareprogramm, auch Anwendungsprogramm oder kurz Anwendung genannt) stellt die softwaretechnische Implementierung einer Methode oder einer Kombination von mehreren Methoden dar, um diese rechnergestützt einsetzen zu können.

Diese Definition impliziert auch, dass es sich bei den in Abbildung 4.2 aufgeführten Werkzeugen um eine oder mehrere implementierte Methoden handelt. Auch die Umsetzung der Bedienschnittstellen erfolgt in letzter Konsequenz u. a. unter Nutzung verschiedener Visualisierungsmethoden. Aus obiger Definition ergibt sich für die weitere Strukturierung des Kapitels eine Beschreibung nach Methodenklassen. Auf eine Beschreibung einzelner Werkzeugklassen kann entsprechend verzichtet werden.

4.2 Klassifikation der Methoden in der Digitalen Fabrik

Abgeleitet aus den in Abschnitt 4.1.2 erläuterten Ordnungsschemata für Methoden und Werkzeuge in der DF werden im Rahmen dieses Buches die in Tabelle 4.1 dargestellten Methodenklassen unterschieden:

Tabelle 4.1 Methodenklassen und die ihnen zugeordneten Methoden

Methodenklasse	Zugeordnete Methoden	Beschreibung in
Informations- und Daten- erhebungsmethoden	Primärerhebung: Befragung Primärerhebung: Manuelle Beobachtung Primärerhebung: Automatische Beobachtung (3D-Laserscanning, Motion-Capturing, Automatische Objektidentifikation) Sekundärerhebung – Dokumentenanalyse	Abschnitt 4.3
Darstellungs- und Gestaltungsmethoden	Ablauf- und Prozessmodellierung Informations- und Datenmodellierung Zustandsmodellierung Strukturmödellierung	Abschnitt 4.4
Mathematische Planungs- und Analysemethoden	Mathematische Optimierung Graphentheoretische Methoden Statistik und Stochastik Vergleichende quantitative Bewertungsmethoden	Abschnitt 4.5
Simulationsmethoden	Kontinuierliche Simulation (Finite-Element-Methode, Mehrkörpersimulation, Ergonomiesimulation, Kontinuierliche Systeme)	Abschnitt 4.6

	Zeitgesteuerte (zeitdiskrete) Simulation Ereignisdiskrete (Ablauf-)Simulation	
Methoden der Künstlichen Intelligenz	Multiagentensysteme Neuronale Netze	Abschnitt 4.7
Visualisierungsmethoden	Visualisierung statischer grafischer Modelle Dynamische Visualisierung (Monitoring, 2D-4.8 und 3D-Animation) VR AR	Abschnitt
Methoden der Kollaboration	Technische Kommunikationsmittel Gemeinsame Informationsräume und Wissensmanagement Workflowmanagement und Workgroup Computing Projektmanagement	Abschnitt 4.9

Aus Vereinfachungsgründen wird eine modellgestützte Methode mit dem Modell für diese Methode gleichgesetzt. Beispielsweise werden für die Prozessmodellierung ein Prozessmodell, für die 3D-Visualisierungsmethode ein 3D-Modell und für die ereignisdiskrete Ablaufsimulation ein ereignisdiskretes Simulationsmodell erstellt und genutzt.

Die folgenden Ausführungen geben einen Überblick über Methoden der DF, die nach Erfahrungen der Autoren für die Praxis relevant sind. Sie erheben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Verwendung einzelner Methoden für unterschiedliche Aufgaben im Rahmen von Fabrikplanung und -betrieb kann daher in den folgenden Ausführungen auch nur exemplarisch behandelt werden. Beispielsweise reichen die Methoden für die Layoutplanung von der aufwendigen manuellen Erstellung von Zeichnungen unter Nutzung grafischer Methoden bis hin zu rechnergestützten Layoutplanungsverfahren unter Verwendung mathematischer Methoden oder auch umfangreicher zwei- oder dreidimensionaler Elementbibliotheken.

4.3 Methoden der Informations- und Datenerhebung

Die Modelle und Methoden in der DF zeichnen sich durch eine möglichst durchgängige digitale Vernetzung aus. Dies erfordert, dass alle für die Planungsaufgaben notwendigen Informationen als Daten in digitaler Form vorliegen müssen. Je nach Art der Informationen können unterschiedliche Methoden der Informations- und Datenerhebung eingesetzt werden. So ist

beispielsweise in einer bestehenden Fabrik die Einplanung neuer Objekte in die vorhandenen Flächen notwendig. Liegt jedoch kein aktuelles Layout in hinreichender Qualität für die weitere digitale Planung vor, wird eine Ist-Aufnahme des aktuellen Standes erforderlich. Entsprechend müssen die für eine Feinplanung fehlenden Leistungsdaten von Maschinen und Anlagenelementen ggf. durch Messungen vor Ort ermittelt werden, während aktuelle Auftragslisten in der Regel aus den Daten der installierten PPS- oder ERP-Systemen abgeleitet werden können. Jedoch sind diese zumeist für spezifische Fragestellungen aufzubereiten.

Die Informations- und Datenerhebung ist ein Teilprozess innerhalb eines umfassenderen Prozesses der Informations- und Datenbeschaffung, der seinerseits eine gezielte Identifikation der zu beschaffenden Information sowie die Vorbereitung und Durchführung der Datenerhebung umfasst. Nach der Informations- und Datenbeschaffung liegen Rohdaten vor, für die in der Regel eine ergänzende Aufbereitung zur Nutzung für die geplante Aufgabenstellung notwendig ist.

Die Durchführung der Informations- und Datenerhebung kann je nach zu erhebenden Daten eine manuelle Erhebung, eine Extraktion der Daten aus ausgewählten Informationsquellen oder eine automatische Erhebung über spezielle Eingabegeräte umfassen.

Die Ergebnisse der Datenerhebung sind im Rahmen der Datenbeschaffung für die jeweilige Planungsaufgabe adäquat bereitzustellen. Dies kann beispielsweise eine manuelle Aufnahme der Informationen mit *anschließender* Datenerfassung am Computer oder eine *integrierte* Datenerhebung und -erfassung beinhalten. Wichtig ist die abschließende Prüfung der erhobenen Daten im Hinblick auf Fehlerfreiheit, Verwendbarkeit, Konsistenz, Plausibilität sowie Vollständigkeit, aber auch im Hinblick auf die Fehlerfreiheit des Erhebungsprozesses selbst.

In Abhängigkeit davon, ob die Daten speziell (primär) für eine Aufgabenstellung ermittelt werden oder zu einem früheren Zeitpunkt zu einem anderen Zweck (sekundär) erhoben wurden (vgl. Hauser 2004), wird nach Primär- und Sekundärdaten unterschieden. Primärdaten entsprechen eher dem aktuellen Bedarf besser als Sekundärdaten, da ihre Erhebung genau für diesen Bedarf durchgeführt wird. Zu den Methoden der Primärerhebung (auch: primärstatistische Erhebung) zählen die Methoden der Befragung (vgl. Abschnitt 4.3.1) und der Beobachtung, die nach Jodin und Mayer (2004) in manuelle und automatische Beobachtungsmethoden klassifiziert sind (siehe Abb. 4.3 sowie Abschnitt 4.3.2 und 4.3.3).

Zu den Methoden der Sekundärerhebung (auch: sekundärstatistische Erhebung) zählen vor allem Methoden der Dokumentenanalyse. In Ergänzung hierzu spricht man von einer tertiärstatistischen Erhebung, wenn es sich bei den erhobenen Sekundärdaten nicht um Rohdaten, sondern um

bereits speziell aufbereitete oder verdichtete Daten handelt (vgl. Hartung et al. 2009).

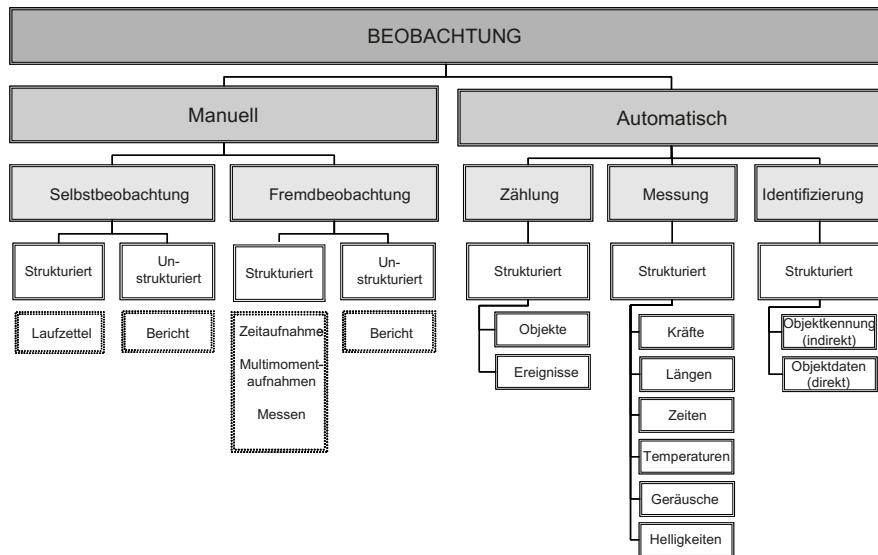


Abb. 4.3 Klassifikation der Methoden nach manueller und automatischer Beobachtung (nach Jodin und Mayer 2004, S. 9)

4.3.1 Primärerhebung – Methoden der Befragung

Die Methoden der Befragung finden ihre primäre Anwendung in der empirischen Sozialforschung, werden aber auch zur Erhebung von Unternehmensdaten eingesetzt und haben zum Ziel, von Personen oder Personengruppen Meinungsbilder, Verhaltensweisen, Prozesse, Datenflüsse oder organisatorische Strukturen zu erfahren. Bei der Befragung wird zwischen dem mündlichen Interview, der EDV-basierten elektronischen Befragung z. B. über das Internet und dem schriftlichen Fragebogen unterschieden. Grundsätzlich steht die Abfrage von Informationen über Personen im Vordergrund. Weitere Ausführungen hierzu sind u. a. in Kromrey (2009) sowie Jodin und Mayer (2004) zu finden.

4.3.2 Primärerhebung – Manuelle Beobachtung

Die manuellen Beobachtungsmethoden lassen sich nach Selbst- und Fremdbeobachtung unterscheiden; die automatischen Methoden sind nach ihrer Intention des Zählens, Messens oder Identifizierens zu differenzieren.

Manuelle Beobachtungsmethoden werden ihrerseits wiederum danach unterschieden, ob der Beobachter selber in den zu beobachtenden Prozess einbezogen ist oder nicht. Bei einer Selbstbeobachtung werden die zu erhebenden Informationen von den betroffenen Personen über einen festgelegten Zeitraum selbst ermittelt und schriftlich fixiert. Hierbei kann eine Berichtsmethode oder das Laufzettelverfahren eingesetzt werden. Die Berichtsmethode lässt sich in Form frei verfasster Tagesberichte durch die beauftragten Personen oder in Form von vorgegebenen Tätigkeitskatalogen oder Tagesberichtformularen umsetzen. Das Laufzettelverfahren ist im Gegensatz zur Berichtsmethode mit einem Objekt wie eine Akte oder ein Transportgut verknüpft; hier werden die Art der Bearbeitung, Eingangs-, Ausgangs- und Bearbeitungszeiten und der Name der bearbeitenden Person protokolliert (vgl. Schulte-Zurhausen 2014). Die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden sind ausführlich u. a. in Wittlage (1993) und Schulte-Zurhausen (2014) diskutiert und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

Im Gegensatz zur Selbstbeobachtung nehmen bei einer Fremdbeobachtung nicht involvierte Beobachter Informationen über den Prozess mit seinen Beteiligten auf und ermitteln auf diese Weise die tatsächlich ablaufenden Vorgänge. Zu beachten ist aber der mögliche Einfluss auf die Leistung einer Person durch die Beobachtung. Typische Methoden der Fremdbeobachtung sind die Zeitaufnahme (Aufnahme der Zeiten mittels Zeitmessgerät für wiederkehrende Aktivitäten), die relativ einfache mathematische Stichprobentechnik der Multimomentaufnahme (vgl. z. B. REFA 1997) sowie das Messen von Gewichten, Größen, Längen und Flächen und das Zählen von Objektanzahlen.

Erhoben werden vor allem prozessabhängige Daten zu Maschinen wie Belegungszeiten oder Störungen, zu Fertigungsaufträgen, zum Lagerbestand und zum Personal. Dabei wird die manuelle Datenerhebung im laufenden Anlagenbetrieb oftmals durch eine Datenerfassung dezentral z. B. über mobile Datenerfassungsgeräte, über Bildschirmarbeitsplätze an Betriebsdatenerfassungssystemen (BDE - Betriebsdatenerfassung) oder Leitständen oder aber auch durch eine direkte Maschinendatenerfassung (MDE - Maschinendatenerfassung) aus der Maschinensteuerung unterstützt. Die Identifizierung der zu erfassenden Objekte kann beispielsweise über Barcode oder Radio Frequency Identification Device (RFID) erfolgen; letztere werden auch Funketiketten genannt. Erfolgt eine rein automa-

tische Datenerhebung unter Nutzung dieser Systeme, handelt sich um Methoden der automatischen Beobachtung.

4.3.3 Primärerhebung – Automatische Beobachtung

Die Methoden der automatischen Beobachtung sind im eigentlichen Sinne auch den Methoden der bereits bei der manuellen Beobachtung aufgeführten Fremdbeobachtung zuzuordnen. Sie nehmen in der DF einen relativ hohen Stellenwert ein, da sie erlauben, die in der realen Fabrikanlage erhobenen Daten in einem sehr viel kürzeren Zeitintervall, mit einem geringeren Fehleranteil und fast ohne Medienbruch in den Modellen der DF zu verwenden. Technische Systeme zur automatischen Datenerhebung (vgl. hierzu auch Abb. 4.3 sowie Jodin 2007) erlauben

- ein einfaches Zählen (Bestimmen der An- oder Abwesenheit eines Objektes oder Ereignisses),
- eine Messung (Ermittlung von Messwerten zu diskreten und kontinuierlichen sowie analogen und digitalen Signalen) oder
- ein automatisches Identifizieren von Objekten (Auto-ID – Automatische Identifikation) beispielsweise über Barcodes oder elektronische Etiketten oder auch anhand von Objektdaten wie Größe, Lage und Form.

Merkmal	Ausprägung (Klassen)
Art der Messgröße	physikalische Größen wie z. B. Masse, Beschleunigung, Länge, Winkel, Geschwindigkeit und Drehzahl oder Anwesenheit und Identität von Objekten
Dimension	0-, 1-, 2- oder 3-dimensional
Erfassung der Messgröße	taktil, nicht taktil
Messprinzip	direkt, indirekt
Messverfahren	optisch, mechanisch, magnetisch, induktiv, akustisch, strahlungs- und radioaktiv-basiert
Darstellung der Messgröße	zeitkontinuierlich oder -diskret, wertkontinuierlich oder -diskret

Abb. 4.4 Sensorklassifizierung (nach ten Hompel et al. 2008, S. 173; in Anlehnung an ten Hompel und Schmidt 2010)

Generell unterscheiden sich die technischen Systeme nach Art der Messgröße, der messbaren Dimension, dem Grad der Berührung mit dem zu messenden Objekt, dem Messprinzip (direkt, d. h. anhand natürlicher Objekteigenschaften; indirekt, d. h. anhand zusätzlicher künstlicher Eigenschaften wie Beschriftungen oder farbliche Markierungen), dem technischen Messverfahren und der Darstellung der zu messenden Größe selbst (vgl. Abb. 4.4 sowie u. a. Jodin 2007 und ten Hompel et al. 2008). Sie basieren auf einem oder mehreren Sensoren, die mit einer entsprechenden Auswerteelektronik verknüpft sind, um das gemessene Signal in digitale Daten umzuwandeln. Die Sensoren unterscheiden sich aufgrund ihrer technischen Gegebenheiten in Bezug auf ihre Einsetzbarkeit und die ermittelte Datenmenge.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Darstellung von drei für die DF interessante automatische Methoden des Messens und Identifizierens.

Das 3D-Laserscanning

Die Erfassung der Bestandsdaten einer Fabrik (Tragstruktur, Hülle, Stahlbau, Haustechnik, Fördertechnik) in Form von 3D-digitalisierten Modellen ist in der Regel mit hohem Aufwand verbunden und stark fehlerbehaftet. Heutige Laserscanner erlauben aufgrund ihrer Erfassungsgeschwindigkeit, Auflösung und Genauigkeit eine exakte, hochauflösende und schnelle Bestandsaufnahme von Fabrikanlagen und Gebäuden. Beim 3D-Laserscanning wird die Oberfläche von Gegenständen mithilfe eines Laserstrahls berührungslos abgetastet. Dabei entsteht eine diskrete Menge von Abtastpunkten mit ihren Koordinaten im Raum, die dann weiterverarbeitet werden können (Messpunktfolke). Anzahl und Genauigkeit der Messpunkte bestimmen die Qualität des Verfahrens.

In Abhängigkeit von dem Einsatzfeld unterscheidet Vetter (2003) für das Laserscanning drei Techniken:

- Der Laser ist ortsfest positioniert und dreht sich horizontal und vertikal in einem bestimmten Winkel.
- Der Laser ist auf einer beweglichen Vorrichtung angeordnet und bewegt sich um das feststehende Objekt.
- Der Laser ist fest installiert und das Objekt befindet sich auf einer drehbaren Vorrichtung.

Während sich die Anwendungsbereiche der zweiten und dritten Variante auf kleine bis mittelgroße Objekte beschränken, eignet sich die erste Variante für das räumliche Scannen ganzer Umgebungen, Häuser und Fabrikanlagen. Erfassungsverfahren für räumliche Szenen werden u. a. in Becker

(2004) und Bruhnke et al. (2003) vorgestellt. Die Verfahren erlauben ein Vermessen von Fabrikobjekten bis zu einer Genauigkeit von 3 mm hinsichtlich Position und Abmessung einzelner Objekte. In Abschnitt 7.1.3 wird die Anwendung des Laserscanning ausführlich erläutert.

Im Rahmen der Arbeiten zur DF werden heute diverse Schritte unternommen, 3D-Planungsdaten mit den gescannten Daten, beispielsweise des Gebäudes oder der Gebäudeinfrastruktur, zu verknüpfen. Abbildung 4.5 verdeutlicht ein Beispiel für die Einbindung von 3D-Laserscandaten eines Gebäudes in das 3D-Planungsmodell einer Anlage.



Abb. 4.5 3D-Messpunktewolke (schemenhaft) eingebunden in ein 3D-Planungsmodell (Quelle: KHS GmbH, Dortmund)

Automatische Motion-Capturing-Verfahren

Eine Aufgabe der computerunterstützten Produktionssystemplanung ist die Simulation manueller Tätigkeiten mithilfe digitaler Menschmodelle. Diese Art der Simulation ist sehr zeitaufwendig und teuer, da die Bewegungsdaten mittels inverser Kinematik (Berechnung der Bewegungsdaten ausgehend von der gewünschten Endposition) erzeugt werden müssen. Verfahren zur digitalen Bewegungsaufnahme bieten eine alternative Möglichkeit der schnelleren und kostengünstigeren Gewinnung solcher Daten (Klippert et al. 2007, S. 61). Hierbei stehen zur Aufnahme digitaler Bewegungsdaten zum einen optische Verfahren zur Verfügung, zum anderen existieren Ver-

fahren, die zur Datengewinnung die Winkel der Gelenke des Probanden erfassen. Dazu kann ein Exoskelett (am Körper des Probanden befestigtes Gestänge) oder an den Gelenkpunkten befestigte Goniometer (Messinstrument zur Bestimmung von Winkeln) verwendet werden. Weitere Verfahren basieren auf spezifischen körperfixierten Sensoren. Zur einfacheren Handhabung sind diese Sensoren meist in einem Anzug integriert, der eine passende Platzierung der Sensoren beim Probanden sicherstellt. Schließlich gibt es Verfahren, die auf einer Kombination mehrerer Varianten beruhen.

Bewegungsaufnahmeverfahren mit körperfixierten Sensoren haben sich für Bewegungsaufnahmen zur ergonomischen Beurteilung von Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie bewährt, da sie auch bei Verdeckung des Probanden durch Anlagen oder Karosserieteile noch verlässliche Bewegungsdaten in Echtzeit liefern (Klippert et al. 2008, S. 892). Ein am Markt verfügbares System wurde an der Universität Kassel für ergonomische Zwecke angepasst, um gewonnene Bewegungsdaten nach ergonomischen Gesichtspunkten zu bewerten (siehe auch Abb. 4.6).



Abb. 4.6 Motion-Capturing-Anzug mit körperfixierten Sensoren zur Bewegungsaufnahme (Quelle: Universität Kassel, Institut für Arbeitswissenschaft und Prozessmanagement)

In dem Motion-Capturing-Anzug, den der Proband trägt, sind Sensoren integriert, die den relevanten Gliedmaßen zugeordnet sind. Die Sensoren sind kommerziell verfügbar, kombinieren mehrere Messverfahren und Methoden der Signalverarbeitung in einem einzigen Bauteil und kompensieren auf diese Weise die Schwächen einzelner Messverfahren (z. B. die Drift bei gyroskopischen Sensoren). Die Daten der Sensoren werden in Echtzeit in einer ebenfalls in den Anzug integrierten Elektronik zusammengefasst und drahtlos an einen Computer übertragen, der die Bewegungsdaten sammelt.

Ausgehend von einer definierten Startposition des Probanden werden so alle Bewegungen in digitale 3D-Daten umgewandelt. Die so gewonnenen Daten können schließlich in der DF verwendet oder einer ergonomischen Analyse unterzogen werden (zur Ergonomiesimulation vgl. auch Abschnitt 4.6.1).

Neben der Bewegungserfassung kann heute auch parallel eine Erfassung der Blickbewegungen zur Prozessschrittermittlung und zum Nutzerstatus erfolgen. Ein Beispiel für ein Eye-Tracking-System ist Abbildung 4.7 zu entnehmen.

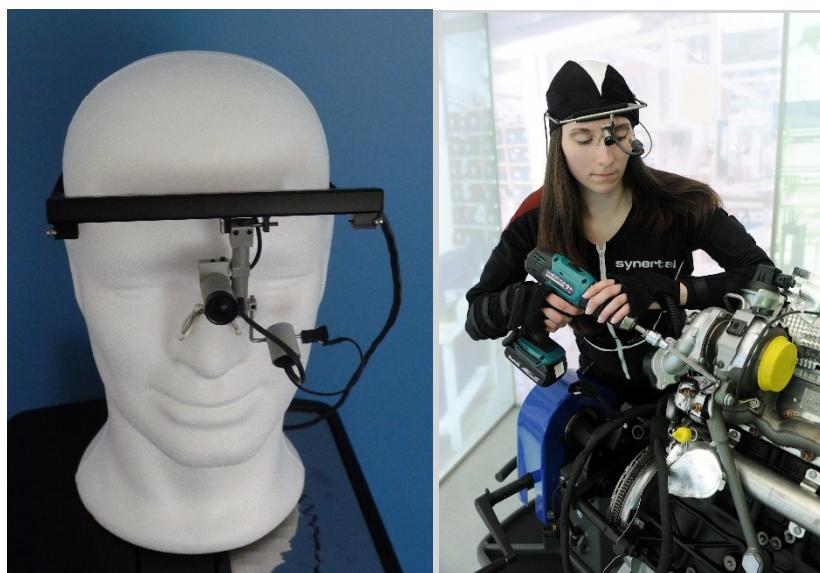


Abb. 4.7 Beispiel für ein Eye-Tracking-System (links) und in Kombination mit einem Motion-Capturing-Anzug (rechts) (Quelle: Universität Kassel, Institut für Arbeitswissenschaft und Prozessmanagement)

Das hier gezeigte Messsystem cEYEberman ermöglicht die Messung der psychischen und physischen Belastung an einem Arbeitsplatz. Eine Blickbewegungsbrille dient zur Aufzeichnung und Analyse des Blickverhaltens während der Interaktion mit dem Arbeitssystem in Echtzeit; das Motion-Capturing-System wird zur Aufnahme von Bewegungsabläufen eingesetzt (vgl. auch Arenius et al. 2013).

Automatische Objektidentifikation mittels RFID

Laut DIN 6763 (1985, S. 2) bezeichnet Identifizieren „[...] das eindeutige und unverwechselbare Erkennen eines Gegenstandes anhand von Merkmalen (Identifizierungsmerkmalen) mit der für den jeweiligen Zweck festgelegten Genauigkeit“. Neben den klassischen optischen Identifikationstechniken unter Nutzung von Barcodes werden heute verstärkt elektronische Datenträger (Transponder, Tag) zur Identifikation von Objekten in der Logistik eingesetzt (zur Klassifikation von Identifikationssysteme für die Logistik vgl. u. a. Lenk (2008, S. 816 ff.) und ten Hompel et al. 2008). Diese RFID-Systeme (RFID – Radio Frequency Identification Device) basieren auf einer zur berührungslosen Erfassung und Übertragung binär codierter Daten mittels induktiver oder elektromagnetischer Wellen und bestehen aus einer Schreib- und Lesestation sowie den an Objekten (z. B. Ladeeinheiten) befestigten Transpondern (vgl. Finkenzeller 2015). Die technischen Ausführungen der RFID-Systeme unterscheiden sich in der Art der Energieversorgung, der verwendeten Speichertechnik und dem für die Datenübertragung genutzten Frequenzbereich. Als Synonyme für RFID werden vermehrt auch Begriffe wie z. B. Funketiketten, Smart Label oder Smart Tag benutzt.

Im Gegensatz zum Barcode ist der verwendete Datenträger in der Regel beschreibbar. Darüber hinaus ist er hinsichtlich Umwelteinflüsse wie Verschmutzungen unempfindlicher, zudem ist der Lese- bzw. Schreibvorgang weitgehend von der Lage des Datenträgers unabhängig (kein Sichtkontakt zwischen den Einheiten notwendig). Allerdings ist ein System mit Transpondern deutlich komplexer im Aufbau sowie kostenintensiver als ein Barcodesystem. Auch bestehen noch nicht gelöste Datensicherheitsprobleme (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2005). Daraus resultiert zum Teil auch ein heftiger Widerstand von Verbraucherorganisationen gegen deren Einsatz, z. B. wegen der Möglichkeit der zeitgleichen Verfolgung (Tracking) von Personen und damit einer RFID-spezifischen Bedrohung der Privatsphäre. Eine Übersicht zu Standardisierungsaktivitäten im Bereich RFID findet sich in Kovács et al. (2012). Anforderungen an Transpondersysteme in unterschiedlichen Einsatzfeldern behandeln verschiedene Blätter der VDI 4472.

Die RFID-Technologie eröffnet grundsätzlich neue Möglichkeiten des automatischen Identifizierens, die auch für die DF von hohem Nutzen sind. Sie lässt neben der klassischen Objektkennzeichnung auch die Verbesserung von Prozessabläufen, die Rückverfolgbarkeit und die Verfahrensvereinfachung sowie eine Diebstahlsicherung oder eine Reduktion von Verlustmengen zu. Interessante datenintensive Anwendungen wie das „Supply Chain Recording“ oder das „Product Life Time Recording“ können auch dem Endverbraucher einen relevanten Zusatznutzen bringen. Beispiele hierfür sind Transparenz in der Lieferkette (Herkunft, soziale und ökologische Aspekte) oder auch im Automobilhandel (Leasing, Wartung, Reparatur, Wiederverkauf oder Recycling).

Echtzeitdatenerfassung im Rahmen von Industrie 4.0

Die Kernelemente von Industrie 4.0 sind, wie bereits erläutert, kommunikationsfähige Cyber Physische Systeme (CPS), bestehend aus Mechatronik, Sensorik, Sende- und Empfangseinheit und einer eingebetteten Logik. In Bezug auf die automatische Datenerfassung ist ihre wesentliche Eigenschaft, dass sie die ständig erfassten Rohdaten des verbundenen mechatronischen Systems oder auch bereits vorverarbeitete Daten nach außen kommunizieren können. Diese Technik wird z.B. in Windturbinen eingesetzt.

Entwicklungen im Umfeld Industrie 4.0 (vgl. z. B. Vogel-Heuser et al. 2017) und damit eng verbunden das *Internet der Dinge* (vgl. Bullinger und ten Hompel 2007; Fleisch 2005), in dem autonome logistische Objekte, wie das Transportgut, die Ladungsträger und auch die Transportsysteme, durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien selbstständig Steuerungsentscheidungen treffen und ihren Weg zu einem definierten Ziel selbst bestimmen, eröffnen den Weg zu einem nächsten Schritt der betrieblichen Informationsverarbeitung. CPS können Daten aus der realen Welt automatisch in Echtzeit zu einem Bruchteil der bisherigen Kosten für die in Teilen manuelle Datenerfassung sammeln. Damit werden bei wachsender Integration von realer und virtueller Welt Medienbrüche vermieden, die Mitverursacher für Langsamkeit, Intransparenz und Fehleranfälligkeit von inner- und überbetrieblichen Prozessen sind.

4.3.4 Sekundärerhebung – Dokumentenanalyse

Eine wichtige Methode der Datenerhebung aus sekundären unternehmensinternen oder -externen Datenbeständen ist die Dokumentenanalyse. Dokumente umfassen alle organisatorischen, technischen und Systemlastda-

ten eines Unternehmens, die elektronisch oder in Papierform (d. h. optisch lesbar) vorliegen. Zu den Dokumenten einer Fabrik gehören beispielsweise Grundstücks- und Gebäude Daten, technische Anlagendaten, Produktionsprogramme, Stücklisten, Arbeitspläne, Lieferscheine, Inventurbestandslisten, Lohnbelege oder auch Aufschreibungen von automatischen und selbst registrierenden Zeitmessgeräten.

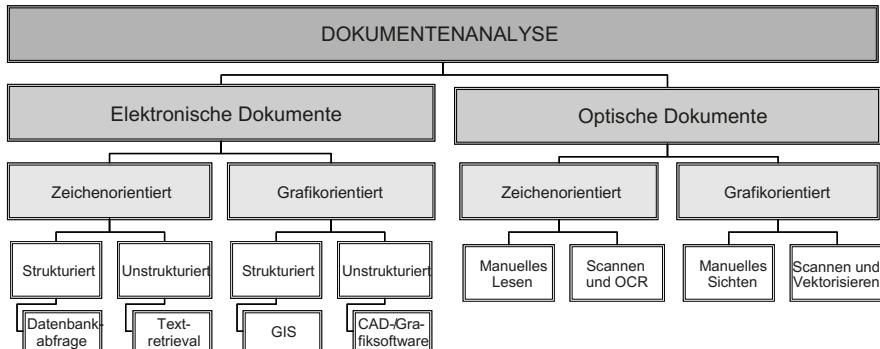


Abb. 4.8 Klassifikation der Methoden der Dokumentenanalyse (in Anlehnung an Jodin und Mayer 2004, S. 17) (Legende: GIS – Geografisches Informationssystem; OCR – Optical Character Recognition)

In Abhängigkeit von Art und Inhalt der vorliegenden Dokumente lassen sich unterschiedliche Dokumentenanalysemethoden einsetzen. Eine entsprechende Klassifikation ist der Abbildung 4.8 zu entnehmen.

4.4 Darstellungs- und Gestaltungsmethoden

Darstellungs- und Gestaltungsmethoden umfassen diejenigen Methoden der Fabrikplanung, die primär die Beschreibung und Darstellung eines Sachverhaltes und nicht die quantitative Analyse zum Ziel haben (vgl. Abschnitt 4.5).

Darstellungs- und Gestaltungsmethoden dienen der Schaffung von Transparenz und Systemverständnis für die am Planungsprozess beteiligten Personen. Ziel ihres Einsatzes ist in erster Linie die Beschreibung und Gestaltung eines Sachverhaltes. Ihr Zweck liegt in der Präsentation und Abstimmung; daher bestimmten Verständlichkeit, Klarheit und Eindeutigkeit der Darstellung die Akzeptanz.

Zu den Darstellungs- und Gestaltungsmethoden zählen typischerweise Methoden zur Erstellung von Prozess- oder Strukturmodellen, aber auch Standort- und Infrastrukturbeschreibungen. Darstellungs- und Gestaltungsmethoden können rein beschreibend (deskriptiv) sein. „Ein deskriptives Modell beschreibt den zu betrachtenden Untersuchungsgegenstand; es ist aber nicht ablauffähig und damit nicht automatisch auswertbar, sondern bedarf des Menschen zur Interpretation [...].“ (VDI 4465 2016, S. 18)

Formale Exaktheit steht bei der Verwendung einer Darstellungs- und Gestaltungsmethode somit nicht zwingend im Vordergrund. Daher können diese Methoden auch semi-formale Beschreibungsmittel nutzen (zur Einteilung von Beschreibungsmitteln vgl. VDI 4465 2016). Eine Klassifikation von Darstellungs- und Gestaltungsmethoden kann z. B. nach der vorherrschenden Modellierungssicht erfolgen. So folgen Bogdanowicz (1997) und Becker et al. (2000) dieser sichtorientierten Einteilung und unterscheiden die funktionale, zustands-, informations- und objektorientierte Sicht. Bei der Modellbildung in der DF sind die folgenden Sichten von besonderem Interesse:

- Prozess- bzw. ablauforientierte Sicht
- Informations- und datenorientierte Sicht
- Zustandsorientierte Sicht
- Struktur- bzw. topologieorientierte Sicht

In Abhängigkeit von der Sicht auf das zu modellierende Systeme unterscheiden sich auch die zu verwendenden Beschreibungsmittel und damit die zu verwendenden Methoden.

Alle Darstellungs- und Gestaltungsmethoden lassen sich auch als *Visualisierungsmethoden* nutzen; in diesem Zusammenhang sei daher auch auf die Ausführungen in Abschnitt 4.8 verwiesen.

Ergänzend ist zu bemerken, dass Darstellungs- und Gestaltungsmethoden, die eine objektorientierte Sicht repräsentieren, in der Regel die obigen unterschiedlichen Sichten mehr oder weniger umfassend vereinen. Hierzu zählt beispielsweise die in der Software-Entwicklung und bei Systemanalyse und -design häufig eingesetzte standardisierte objektorientierte grafische Unified Modeling Language (UML – Unified Modeling Language). Diese Modellierungssprache stellt unterschiedliche Struktur- und Verhaltensdiagramme zur Modellierung eines Systems wie beispielsweise Klassenstrukturdiagramme, Sequenzdiagramme, Zustandsdiagramme und Aktivitätsdiagramme zur Verfügung (vgl. beispielsweise Booch et al. 2006).

4.4.1 Methoden zur Ablauf- und Prozessmodellierung

Darstellungs- und Gestaltungsmethoden zur Ablauf- und Prozessmodellierung dienen der Abbildung unterschiedlicher Arten von Vorgehensweisen und Prozessen wie beispielsweise von Steuerungs-, Management-, Logistik- oder Geschäftsprozessen. Sie erfordern spezielle Notationen, wie sie über Ablaufdiagramme aus dem Software Engineering, über erweiterte ereignisgestützte Prozessketten (eEPK, Keller et al. 1992), über die grafische Methode SADT (Structured Analysis and Design Technique, vgl. (Claus und Schwill 2006, s. v. SADT-Methode), der standardisierten Business Process Modeling Notation (BPMN) (OMG 2009), dem Wertstromdiagramm (Rother und Shook 2000) oder dem Prozesskettenparadigma nach Kuhn (1995) für logistische Prozesse zur Verfügung stehen. Auch Flussdiagramme im Sinne von Ablaufschemata zur Verdeutlichung von Material- und Informationsflüssen zwischen Vorgangssfolgen oder Arbeitsablaufschema (Operationsfolgediagramme) gehören in diese Methodenklasse. Ein bewährtes Modell zur Abbildung des Auftragsdurchlaufs einer Fabrik ist auch das am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Universität Hannover entwickelte Trichtermodell mit Durchlaufdiagrammen und logistischen Kennlinien, s. auch Abb. 4.15 (Nyhuis und Wiendahl 2012).

Methoden zur Ablauf- und Prozessmodellierung unterstützen also eine mehr oder weniger detaillierte Modellierung von Verhaltensweisen, Prozessen und Funktionen, ggf. mit ergänzenden Angaben der Prozesseingangs- und -ausgangsgrößen. Sie werden zur Modellierung von Geschäftsprozessen, von Materialflüssen zwischen Wareneingang und Warenausgang, aber auch von Wertströmen über Standort- und Unternehmensgrenzen (Supply Chain) hinweg eingesetzt. Die von ihrem Ursprung her für das Software Engineering konzipierte Methode SADT erlaubt beispielsweise mit ihren sogenannten Aktivitätsdiagrammen die Beschreibung von Aktivitäten mit den zugehörigen Informationsflüssen (funktionale Sicht). Ausgehend von den Aktivitäten (Prozessschritten) werden die jeweiligen Eingangs- und Ausgangsinformationen den notwendigen Funktionen zugeordnet. Durch die Vernetzung mehrerer Aktivitäten können komplexe Zusammenhänge dargestellt werden. Die Notation BPMN hat hingegen zum Ziel, über eine verständliche standardisierte Darstellung die Modellierung der Geschäftsprozesse und ihre technische Implementierung enger zu verzahnen und bindet die Anforderungen an die Prozessimplementierung und die IT-Services bereits in die Beschreibung der Geschäftsprozesse ein.

Abbildung 4.9 zeigt einen Ausschnitt aus einem Rohbauplanungsprozess anhand eines SADT-Modells. Das Festlegen der Fertigungsfolge und des Mengengerüstes werden jeweils als Aktivitäten mit ihren zugehörigen

Ein- und Ausgangsinformationen beschrieben. Darüber hinaus werden die den Aktivitäten zugehörigen Steuerungsdaten (in diesem Fall die Liste aller möglicher Fertigungsfolgen und die möglichen Mengengerüste) sowie der zugehörige Akteur, der die Aktivität durchführt bzw. bearbeitet (beispielsweise der Fertigungsplaner), der jeweiligen Aktivität zugeordnet.

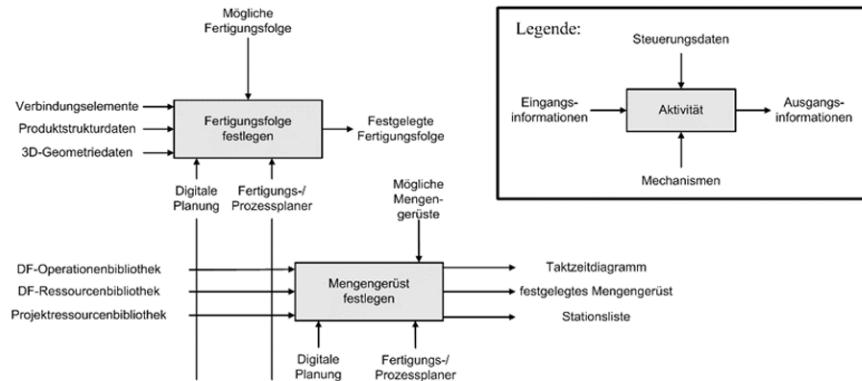


Abb. 4.9 Beispiel für die Modellierung von Planungsaktivitäten unter Verwendung von SADT (in Anlehnung an Bleuel et al. 2009)

Bereits anhand dieses einfachen Beispiels werden die Möglichkeiten der Prozessmodellierungssprachen deutlich. Zurzeit erfahren sie daher auch in der industriellen Anwendung einen verstärkten Einsatz zur systematischen Erfassung der Planungsaktivitäten mit ihren jeweiligen Informationsflüssen als vorbereitende Maßnahmen zur Umsetzung der Konzepte zur DF.

4.4.2 Methoden zur Informations- und Datenmodellierung

Darstellungs- und Gestaltungsmethoden zur Informations- und Datenmodellierung ermöglichen es, Daten- und Informationsflüsse, Datenstrukturen sowie Informationsobjekte und ihre Beziehungen zueinander abzubilden. Zu diesen Methoden zählen u. a. Datenflussdiagramme oder Entity-Relationship-Modelle (ER-Modelle) (Chen 1976; Balzert 2009; Vossen 2000). Letztere werden vor allem zum Datenbankentwurf verwendet, da sie eine übersichtliche Beschreibung statischer Informationszusammenhänge schaffen und die Konzeption einer Datenbank unabhängig von einem konkreten Datenbanksystem ermöglichen. Sie nutzen zur Modellierung Objekte (Gegenstände, Entitäten, engl. entities) und Beziehungen (Relationen, engl. relationships) zwischen diesen und lassen sich

als Graph (ER-Diagramm) mit Knoten und Kanten veranschaulichen (siehe auch Beispiel in Abb. 4.10).

Entitätstypen klassifizieren Entitäten, deren Eigenschaften sich durch gleiche Attribute beschreiben lassen. Über ein sogenanntes Schlüsselattribut sind dann die Entitäten eines Entitätstyps eindeutig zu identifizieren. Grafisch veranschaulicht werden Entitätstypen über Rechtecke, ihre Eigenschaften jeweils über Rechtecke mit abgerundeten Ecken; die logischen Beziehungen zwischen Entitäten werden durch Rauten dargestellt und über die Kanten mit den Entitätstypen verbunden. An einer Kante wird die Anzahl der Beziehungen zwischen den beteiligten Entitätstypen abgetragen (Kardinalität). Die Kardinalität kann genau eine Beziehung (1), eine oder keine (choice, c), eine oder mehrere (multiple, m) oder eine, keine oder mehrere (mc) umfassen.

Abbildung 4.10 stellt beispielhaft einen Auszug aus einem Referenzsystem zur Stücklistenspeicherung für Erzeugnisreihen als ER-Modell dar. Zur Erläuterung der Kardinalität sei auf die Beziehung zwischen Merkmalswert und Merkmal hingewiesen: In dem Beispiel gehört ein Merkmalswert zu einem Merkmal; aber einem Merkmal können auch mehrere Merkmalswerte zugeordnet sein.

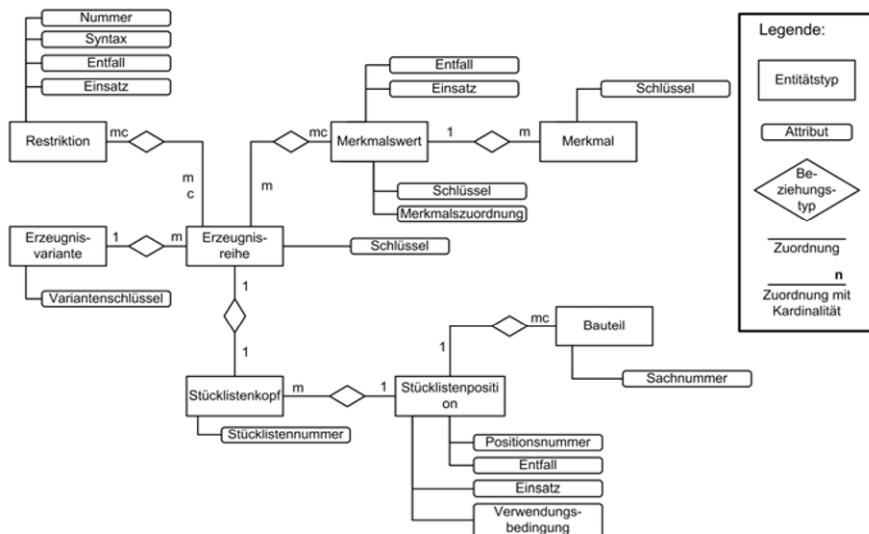


Abb. 4.10 Beispiel eines ER-Datenmodells zur Beschreibung von Planungsdaten (in Anlehnung an von Eisenhart Rothe 2002, S. 42)

Die Methoden zur Informations- und Datenmodellierung werden im Kontext der DF insbesondere zur Modellierung einer Planungsdatenbasis

genutzt; beispielsweise werden Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten und ihre Beziehungen zueinander unter Verwendung dieser Methoden in Form von Datenmodellen spezifiziert.

4.4.3 Methoden zur Zustandsmodellierung

Zu den Gestaltungsmethoden für eine Zustandsmodellierung zählen Zustandsautomaten (Hopcroft et al. 2006) und die von C. A. Petri (1962) vorgeschlagenen Petrinetze (Reisig 1986; Balzert 2009, S. 303 ff.). Sie ermöglichen die Beschreibung nebenläufiger und synchronisierter Prozesse über die Modellierung von Zuständen und Zustandsübergängen. Da mit ihnen kausale Zusammenhänge zwischen Teilprozessen dargestellt werden können, lassen sie sich auch gut zur Modellierung von Steuerungsregeln einsetzen.

Abbildung 4.11 stellt beispielhaft ein Petrinetz zur Steuerung von zwei parallel arbeitenden Bestückungsrobotern dar, die Leiterplatten mit elektronischen Bauteilen von einem Fließband zur Bestückung entnehmen und im Anschluss auf ein weiteres Fließband legen (vgl. hierzu ausführlich Balzert 2009, S. 348).

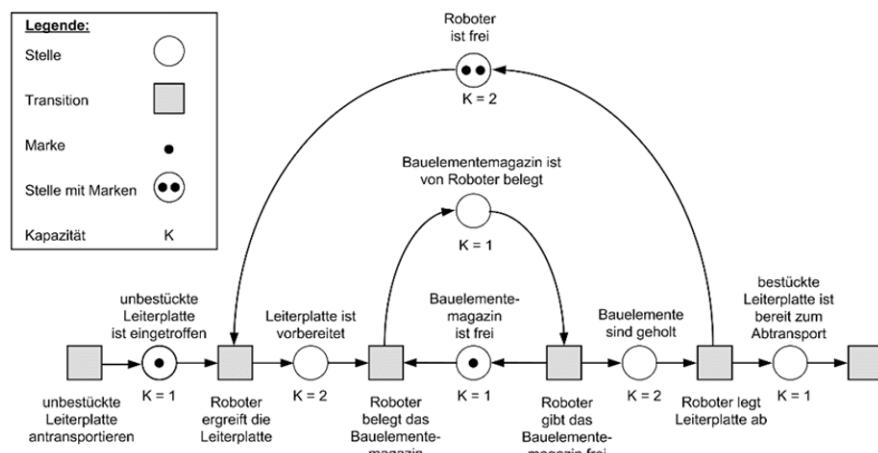


Abb. 4.11 Beispiel eines Petrinetzes (Stellen-/Transitionsnetz eines Bestückungsroboters) (in Anlehnung an Balzert 2009, S. 310)

Das verwendete Petrinetz als Stellen-/Transitionsnetz bezeichnet einen gerichteten Graphen, der aus zwei verschiedenen Knotentypen, den Stellen (auch Plätze oder Zustände) und den Transitionen (auch Zustandsübergänge) besteht. Zur Beschreibung dynamischer Vorgänge werden sogenannte

Marken (auch Objekte genannt) verwendet, die die Stellen belegen können. Die Logik zur Definition der Bewegungsabläufe der Marken im Petrinetz wird über Schaltregeln formuliert, die festlegen, wann eine Transition schaltet. Über die Kapazität K wird die Ressourcenkapazität angegeben; so wird über $K = 2$ (Roboter ist frei) in Abbildung 4.11 gekennzeichnet, dass es sich um zwei Roboter handelt, die beide in dem in der Abbildung dargestellten Zustand frei sind.

4.4.4 Methoden zur Strukturmodellierung

Die topologie- oder strukturorientierte Betrachtung eines Sachzusammenhangs oder eines Systems kann durch den Einsatz von Darstellungs- und Gestaltungsmethoden zur Strukturmodellierung unterstützt werden. Diese ermöglichen die Abbildung einer Produktstruktur oder die Zuordnung von Produktgruppen ebenso wie die Verdeutlichung von Strukturen eines Produktionssystems. Damit beschreiben sie eine räumliche oder logische Zuordnung von Komponenten zueinander. Gudehus (2011, S. 85) spricht bei einer abstrakten Darstellung der räumlichen Struktur eines Logistiksystems von sogenannten logistischen Strukturdigrammen. Diese erlauben die Abbildung einer Systemstruktur mit den operativen und administrativen Leistungsstellen und -bereichen sowie den Material- und Informationsflüssen.

In quantifizierten Strukturdigrammen werden auch die Durchsatzmengen der Material- und Informationsflüsse sowie die Lager- und Pufferbestände abgebildet. Weitere Beispiele für Darstellungs- und Gestaltungsmethoden zur Strukturmodellierung sind Organigramme, Konstruktionszeichnungen, Architekturpläne oder auch Layoutzeichnungen, die sich durch ihre Ähnlichkeit hinsichtlich der topologischen Struktur zum Originalsystem auszeichnen. Auch strukturbefahzte Sankeydiagramme (zum Begriff Sankeydiagramme vgl. Abschnitt 4.8.1), in denen die mengenmaßstäbliche Darstellung der Transportströme als Belastung der Wege in ein Layout eingetragen werden, gehören in diese Kategorie (vgl. auch Arnold und Furmans 2009, S. 251-252). Ein Beispiel für ein strukturbefahftes Sankeydiagramm auf der Basis eines in ein Layout eingeblendeten Detailsimulationsmodells ist in Abschnitt 7.3.1, Abbildung 7.14, dargestellt. In der Software-Entwicklung dienen Struktogramme oder auch Nassi-Shneiderman-Diagramme (vgl. DIN 66261 1985) als Beschreibungsmittel für die strukturierte Programmierung und unterstützen die Reduzierung von Strukturfehlern.

4.5 Mathematische Planungs- und Analysemethoden

Im Gegensatz zu den Darstellungs- und Gestaltungsmethoden ist das Ziel der mathematischen Planungs- und Analysemethoden, quantifizierbare Zusammenhänge für das zu untersuchende System zu formulieren. Analytische Modelle sind somit formale Modelle, die mathematische Funktionen und Rechenregeln nutzen, um Erkenntnisse über die Wirkzusammenhänge und Ergebnisse zu gewinnen.

Die in diesem Abschnitt betrachteten Planungs- und Analysemethoden werden nach Art der *verwendeten mathematischen Methoden* in mathematische Optimierung, Graphentheorie, Statistik und Stochastik sowie vergleichende quantitative Bewertungsmethoden unterschieden. An dieser Stelle würde es allerdings den Rahmen des Buches sprengen, eine vollständige Unterteilung und Beschreibung aller bekannten mathematischen Methoden aufzuzeigen. Auch spezifische mathematische Methoden zur Berechnung von logistischen oder produktionslogistischen Kennzahlen oder zur Dimensionierung von Betriebsmitteln werden im Folgenden nicht näher behandelt. Hier sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. z. B. Domschke et al. 2015).

In diesem Abschnitt werden vielmehr nur einige aus Praxissicht wichtige Methoden kurz erläutert und in einen Zusammenhang gestellt. Typische Anwendungsbereiche sind Layoutplanung und Konstruktion, die Kollisionsberechnung, die Beurteilung von Planungsvarianten oder auch die PPS. Simulationsmethoden zur Abbildung von dynamischen Zusammenhängen werden in Abschnitt 4.6 behandelt.

4.5.1 Methoden der mathematischen Optimierung

„Optimierungsmodelle bestehen aus einer Menge von Lösungen und einer oder mehrerer zu maximierenden oder zu minimierenden Zielfunktionen.“ (vgl. Scholl 2008a, S. 37). Die Methoden der mathematischen Optimierung beschreiben eine Problemstellung über ein analytisches Modell und dienen seiner quantitativen Analyse. Grundsätzlich können Optimierungsmethoden nach der Anzahl der Zielfunktionen (einkriteriell, multikriteriell), nach der Linearität der Zielfunktionen und der Restriktionsfunktionen (linear, nicht linear), nach den Wertebereichen der Variablen ((gemischt-) ganzzahlig, (gemischt-) binär) und nach der Zufälligkeit der zugrunde liegenden Daten (deterministisch, stochastisch) unterteilt werden.

Im einfachsten Fall liegt ein deterministisches, einkriterielles, lineares Optimierungsmodell vor. Dann sind die Zielfunktion $F(x)$ und alle Funktionen zur Beschreibung von Restriktionen $g(x)$ lineare Funktionen. Die

Wertebereiche der Variablen dürfen nur nichtnegative reelle Zahlenwerte annehmen. Die gesuchte Lösung lässt sich aufgrund der formulierten Zielfunktion zweifelsfrei ermitteln. Zur Lösung von Aufgaben der linearen Optimierung bzw. linearen Programmierung (LP – Lineare Programmierung) wird beispielsweise das von Dantzig entwickelte Simplexverfahren genutzt.

Viele Entscheidungsprobleme in Produktion und Logistik sind allerdings kombinatorischer Natur; sie lassen sich nur als (gemischt-) ganzzahlige lineare Optimierungs- oder MIP-Modelle (MIP – Mixed Integer Programs) formulieren. Nach Domschke et al. (2015, S. 9) lassen sich diese Problemklassen grob in Reihenfolge-, Gruppierungs-, Zuordnungs- und Auswahlprobleme unterteilen. Bei kombinatorischen Optimierungsverfahren wächst mit der Problemgröße exponentiell auch die Anzahl der Lösungen. Für einige Probleme sind allerdings effiziente Lösungen bekannt; diese werden als polynomial lösbar bezeichnet. Nichteffiziente Verfahren lassen sich in exakte und heuristische Verfahren unterteilen. In die Klasse der exakten MIP-Verfahren gehören beispielsweise das Branch-and-Bound-Verfahren oder das Travelling-Salesman-Problem. Zu den heuristischen Verfahren zählen Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren. Während Eröffnungsverfahren eine zulässige (Anfangs-)Lösung für ein Problem ermitteln, gehen Verbesserungsverfahren von einer zulässigen Lösung aus und versuchen diese sukzessive zu optimieren. Damit Verbesserungsverfahren nicht in einem lokalen Optimum enden, wurden verschiedene Strategien, sogenannte Meta-Heuristiken, entwickelt. Hierzu zählen u. a. das Simulated Annealing, bei dem die Züge zur Zielereichung zufällig ausgewählt werden, das deterministische Tabu Search Verfahren sowie genetische Algorithmen, die ebenfalls stochastische Meta-Strategien darstellen (vgl. beispielsweise Scholl 2008b).

Im Gegensatz zu einkriteriellen Optimierungsverfahren berücksichtigen multikriterielle (mehrdimensionale) Optimierungsverfahren einen Zielfunktionsvektor, d. h. mehrere Zielfunktionen bzw. -kriterien. In diesem Fall kann eine optimale Lösung nur dann ermittelt werden, wenn die Ziele nicht miteinander in Konkurrenz stehen oder in eine eindeutige Rangfolge zu stellen sind. Ist dies nicht möglich, lässt sich nur für jedes einzelne Ziel eine individuelle optimale Lösung finden, nicht aber ein Gesamtoptimum. Durch die Formulierung einer Meta-Zielfunktion als Kompromisslösung wird der multikriterielle Ansatz zu einem einkriteriellen Kompromissmodell vereinfacht (vgl. u. a. Scholl 2008a).

Bei stochastischen Optimierungsmodellen (vgl. Dinkelbach und Kleine 1996) treten in der Parameterbelegung Unsicherheiten, d. h. Zufälligkeiten, auf. Dies führt zwangsläufig dazu, dass keine eindeutige optimale und zulässige Lösung gefunden werden kann. Auch in diesem Fall lassen sich

durch unterschiedliche Verfahren deterministische einkriterielle Ersatzmodelle entwickeln, so dass wiederum die deterministischen Lösungsverfahren greifen. Die einfachste Form der stochastischen Optimierung ist das Random Search als stochastische Suche; weiterhin sind das bereits erwähnte Simulated Annealing sowie genetische Algorithmen stochastische Verfahren.

Der Grundgedanke der *dynamischen* Optimierung besteht darin, dass das Optimierungsproblem in einen zeitlichen Verlauf gebracht und somit als n-stufiger Prozess interpretiert wird, für den eine optimale Strategie gesucht wird.

Eine umfassendere Darstellung von mathematischen Optimierungsverfahren würde an dieser Stelle den Rahmen des Buches sprengen, daher sei auf die einschlägige Literatur des Operations Research wie Domschke et al. (2015) verwiesen. Beispiele für Optimierungsprobleme in Produktion und Logistik beziehen sich u. a. auf Fragen der Transportoptimierung (z. B. Berechnung des kürzesten Weges, Fahrzeuganzahl), der Tourenplanung, der betrieblichen Standortplanung und der mehrstufigen Warehouse-Location-Probleme (Domschke et al. 2008, S. 95 ff.) oder auch der Losgrößenplanung. Diese und weitere Beispiele sind u. a. in Gudehus (2011), Scholl (2008b), in Arnold und Furmans (2009) oder in März et. al. (2010) ausgeführt. Eine Vielzahl von Optimierungsverfahren bezieht sich auch auf geometrische Fragestellungen wie beispielsweise der Packoptimierung (vgl. auch Abschnitt 2.4).

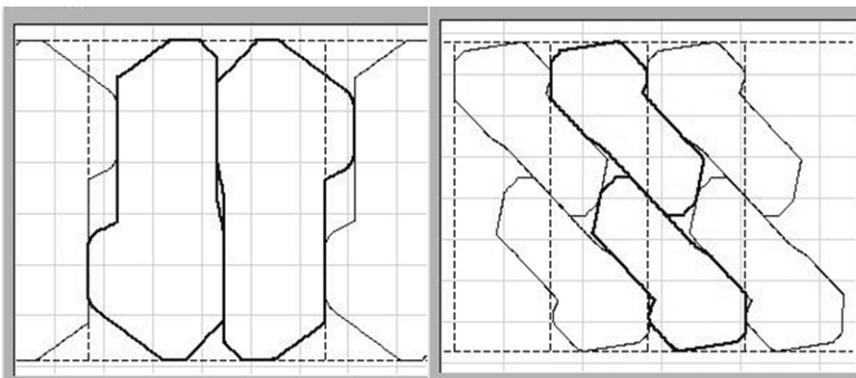


Abb. 4.12 Optimierung einer Platinenschachtelung: (links) vor der Optimierung – (rechts) nach Einsatz der Optimierung (Quelle: Volkswagen AG)

Abbildung 4.12 verdeutlicht ein Optimierungsbeispiel zur Platinenschachtelung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Materialkosten für

verschiedene Coil-Breiten (links: vor der Optimierung, rechts: nach Einsatz der Optimierung). Ziele der Optimierung sind hier die Minimierung der Materialkosten, die Minimierung des Materialverbrauches und eine optimierte Prognose für die Bauteilbeeinflussung. Messkriterien umfassen die Materialkosten und den Materialnutzungsgrad.

Optimierungsmethoden werden heute vielfach auch in Kombination mit anderen Analysemethoden genutzt. So kann beispielsweise über die kombinierte Nutzung von Optimierungs- und Simulationsmethoden ein produktionslogistischer Untersuchungsgegenstand ggf. sehr viel besser nachgebildet werden als durch die Nutzung nur einer einzelnen Methode. Während Systemtopologie und eine einfache Steuerungslogik über ein Simulationsmodell repräsentiert werden, werden die Strategien zur Transportplanung oder Produktionsprogrammeinplanung über geeignete Optimierungsmethoden modelliert. Oftmals ist eine entsprechende Integration derartiger Optimierungsmethoden in den Simulationswerkzeugen schon enthalten.

Darüber hinaus können Optimierungsmethoden ebenfalls genutzt werden, um bei vorgegebener Zielfunktion Parametervariationen für die Experimentplanung auf der Basis eines Simulationsmodells gezielt und ggf. automatisiert vorzunehmen. Hinweise zu den Integrationsmöglichkeiten von Simulations- und Optimierungsverfahren für Produktion und Logistik finden sich u. a. in der VDI 3633 Blatt 12 (2016) sowie bei Krug und März (2010).

4.5.2 Graphentheoretische Methoden

Die Graphentheorie beschreibt einen Sachverhalt über gewichtete gerichtete und ungerichtete Graphen, so dass kombinatorische Probleme gelöst werden können. Eine auch in der Produktions- und Logistikplanung eingesetzte graphentheoretische Methodik ist die Netzplantechnik, mit der komplizierte Prozessverläufe systematisch dargestellt und analysiert werden können. Die Netzplantechnik (vgl. auch DIN 69900 2009) bezeichnet ein Verfahren zur Analyse, Beschreibung, Planung, Steuerung und Überwachung von Abläufen auf der Grundlage der Graphentheorie. Hierbei können Zeit, Kosten, Ressourcen oder auch weitere Größen berücksichtigt werden.

Typische Anwendungen der Netzplantechnik umfassen die Aufgaben des Projektmanagements Abb. 4.13 zeigt ein stark vereinfachtes Beispiel eines Bauprojektes.

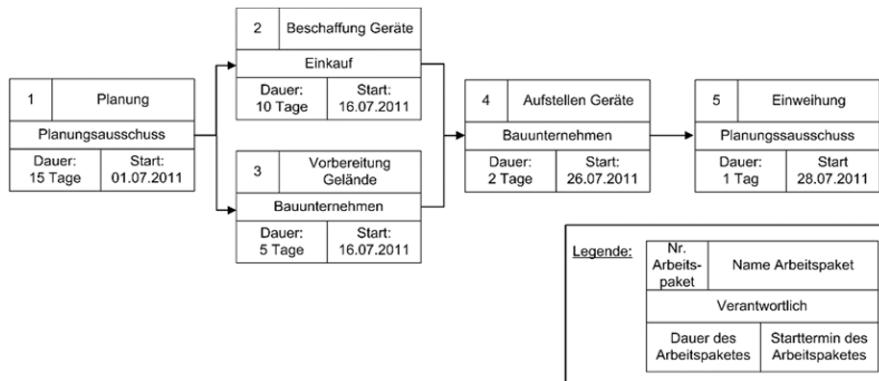


Abb. 4.13 Beispiel für den Netzplan eines Bauprojektes nach der Metra-Potential-Method (MPM)

Spezielle Methoden der Netzplantechnik (vgl. beispielsweise Neumann 1992, S. 116 ff.; Burghardt 2013) sind die Metra-Potential-Method (MPM – Metra-Potential-Method, Vorgangs-Knoten-Netze), die Program Evaluation and Review Technique (PERT – Program Evaluation and Review Technique, Ereignis-Knoten-Netze) oder auch die Critical-Path-Method (CPM – Critical-Path-Method, Vorgangs-Pfeil-Netze).

4.5.3 Methoden der Statistik und Stochastik

Die Methoden der Statistik (vgl. beispielsweise Fahrmeir et al. 2016; Hartung et al. 2009) lassen sich hinsichtlich der *Datenanalyse* entsprechend den statistischen Grundaufgaben in die Deskription (das Beschreiben), die Exploration (das Suchen) und die Induktion (das Schließen) unterscheiden. Während sich die deskriptive Statistik mit der beschreibenden und grafischen Aufbereitung und Komprimierung von Daten (Merkmale oder Variablen) auseinandersetzt, behandelt die explorative Statistik das Auffinden von Besonderheiten und Strukturen in Daten, um ggf. neue Fragestellungen oder Hypothesen zu formulieren. Innerhalb der induktiven Statistik werden statistische Schlüsse mittels stochastischer Modelle gezogen, d. h. die induktive Statistik bedient sich der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Stochastik.

Methoden der *deskriptiven Statistik* dienen zur Beschreibung und Darstellung von ein- oder mehrdimensionalen Daten. Hierzu zählen beispielsweise Stab-, Säulen-, Balken- oder Kreisdiagramme. Einfache Methoden der *explorativen Statistik* sind zum Beispiel grafische Darstellungen wie Box-Plots, mit denen die Verteilung statistischer Daten über den Median,

die Streuung und die beiden Extremwerte (Minimum, Maximum) charakterisiert werden. Auch Maßzahlen wie das arithmetische Mittel oder die Streuung der Daten gehören zu den einfachen Methoden. Typischerweise nutzt die explorative Statistik Methoden, mit denen Zusammenhänge in größeren Datenmengen ermittelt werden können. Hierzu zählen beispielsweise Korrelationsanalyse, Regressionsanalyse oder Datentransformationen zur Darstellung von Gesetzmäßigkeiten in Daten.

Für den Bereich Produktion und Logistik umgesetzte Verfahren der explorativen Statistik sind beispielsweise die ABC-Analyse als Wert-Häufigkeitsverteilung. Sie wird z. B. bei der Analyse von Artikeln zur Festlegung von Lagerbereichen für die Bestimmung der Relevanz eines Artikels am Gesamtumfang aller Artikel eingesetzt. Hierzu werden die in einem System befindlichen Artikel hinsichtlich eines vorgegebenen Merkmals analysiert und eingeteilt. Auf Basis einer Aufsummierung der Werte des Merkmals (z. B. Jahresverbrauch) erfolgen eine wertmäßige Sortierung und eine Berechnung der prozentualen Anteile am Gesamtwert. Über die kumulierten Anteile einzelner Merkmale erfolgt dann eine unternehmensseitig frei festlegbare Einteilung in üblicherweise drei Klassen (A – hohe Relevanz, B – normale bis mittlere Relevanz; C – geringe Relevanz). In der Regel haben eine geringe Anzahl an Elementen eine hohe Relevanz und eine hohe Anzahl an Elementen eine geringe Relevanz in Bezug auf ein betrachtetes Merkmal. Zu analysierende Merkmale können Kosten, Umsatz, Verbrauch, Preis oder auch Anzahl der Ein- und Auslagerungen eines Artikels sein. In Ergänzung zur ABC-Analyse kann die XYZ-Analyse durch Klassifikation in Produktklassen (X, Y, Z) hinsichtlich qualitativer Merkmale wie Verbrauchsstruktur oder Bedarfsdynamik eingesetzt werden.

Ein weiteres dieser Kategorie zuzuordnendes Verfahren ist die PQ-Analyse (PQ – Produkt-Quantum-Analyse), die eine Analyse des Produktionsprogramms in Bezug auf Faktoren wie Umsatz, Gewinn, Herstellungskosten, Durchlaufzeiten oder Fertigungsstunden zulässt (vgl. Grundig 2015).

Im Gegensatz zur deskriptiven und explorativen Statistik geht die *induktive Statistik* davon aus, dass keine vollständige Grundgesamtheit der Daten vorliegt, sondern nur eine Stichprobe, von der auf die Grundgesamtheit geschlossen werden soll. Die induktive Statistik beschäftigt sich mit der Analyse von statistischen Daten und der Prüfung von statistischen Hypothesen und bedient sich zu diesem Zweck der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die die Gesetzmäßigkeiten zufälliger Ereignisse behandelt. Zu den Methoden der induktiven Statistik zählen u. a. statistische Schätzverfahren, die genutzt werden, um aus den Werten einer Stichprobe auf charakteristische Größen (Maßzahlen) der zugehörigen Grundgesamtheit zu schließen und somit das vorliegende Datenmaterial durch eine geeignete Häufig-

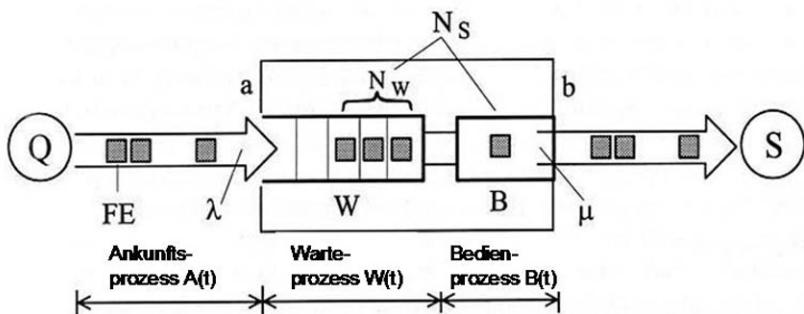
keitsverteilung zu beschreiben. Schätzverfahren werden beispielsweise bei der globalen Personalbedarfsermittlung (vgl. Grundig 2015, S. 95) eingesetzt. Ein ähnlicher Sachverhalt liegt auch vor, wenn Rohdaten für eine Simulation ermittelt werden und für die Bestimmung von Verteilungen für ein Simulationsmodell aufbereitet werden sollen. Statistische Prüfverfahren haben zum Ziel, zu prüfen, ob bestehende Abweichungen zufälliger Natur sind und welche Signifikanz ihnen zuzuschreiben ist. Bei den Prüfverfahren werden grundsätzlich die Maßzahlen zweier Stichproben oder die Maßzahl einer Stichprobe mit der bekannten Größe der Grundgesamtheit verglichen. Ein statistischer Test, der hier häufig zum Einsatz kommt, ist der Chi-Quadrat-Anpassungstest (vgl. Fahrmeir et al. 2016, S. 409 ff.; Arnold und Furmans 2009, S. 105 ff.).

Eine wichtige Anwendung ist die Modellierung stochastischer Prozesse, die durch stetige oder diskrete Zufallsgrößen beschrieben werden. So ist die Lebensdauer einer Glühbirne eine zufällige Funktion in Abhängigkeit von der Einsatzzeit und ggf. weiterer Einsatzbedingungen. Spezifische stochastische Prozesse sind sogenannte Markov-Prozesse, die die Eigenschaft besitzen, dass sich die Kenntnis über den zukünftigen Prozess nur aus dem gegenwärtigen Prozesszustand ergibt, d. h. alle Einflüsse der Vergangenheit sind in dem aktuellen Zustand enthalten. Damit muss bei der Abbildung derartiger Prozesse nur der gegenwärtige Zustand mit allen Übergangswahrscheinlichkeiten in die jeweils möglichen Zustände abgebildet werden. Markov-Prozesse spielen bei der Abbildung von Bedienprozessen eine wichtige Rolle.

Für die Systemanalyse und -gestaltung werden zufällige Prozesse oftmals unter Nutzung der *Warteschlangen- oder auch Bedientheorie* modelliert und analysiert. Hier wird davon ausgegangen, dass das zu betrachtende System aus einer oder mehrerer Bedienstationen und einem Warteraum besteht. Die Merkmale des Ankunftsprozesses, die Eigenschaften des Bedienprozesses, die Anzahl der parallelen Bedienstationen oder auch Bedienungskanäle, das Warteverhalten der Aufträge (oder auch Forderungen), die Kapazität der Auftragsquelle und die Struktur des Bediensystems bestimmen letztendlich die Eigenschaften des Bediensystems. Ein Materialflusssystem zeichnet sich durch eine Vielzahl aneinander gereihter Bediensysteme aus. Abbildung 4.14 stellt den Aufbau und die Struktur eines einfachen Bediensystems, hier einen Arbeitsplatz mit wartenden Aufträgen, dar.

Der *Ankunftsprozess $A(t)$* bestimmt die Art und Weise der Ankünfte von Aufträgen im System. Er wird wesentlich geprägt durch die Zeitabstände zwischen den Ankunftszeitpunkten der nacheinander eintreffenden Aufträge. Diese sogenannten Zwischenankunftszeiten können beispielsweise exponentiell-, erlang- oder normalverteilt sein. Neben stochastischen Zwi-

schenankunftszeiten gibt es auch Ankunftsprozesse mit getakteten Zeitabständen. Der *Bedienprozess* $B(t)$ realisiert die Bedienung, d. h. die Bearbeitung der Aufträge; die Bedienzeit wird ebenfalls in der Regel durch Verteilungen beschrieben. So werden beispielsweise Bedienprozesse mit konstanter Bedienzeit (z. B. Taktfertigung), Bedienprozesse mit exponentiell verteilter Bedienzeit (z. B. Reparaturzeiten) oder Bedienprozesse mit erlangverteilter Bedienzeit (z. B. Zeiten für die Datensatzbereitstellung bei NC-Steuerungen) unterschieden. Der *Warteprozess* $W(t)$ wird durch den Ankunfts- und Bedienprozess bestimmt.



FE	=	Fördereinheit	N_w	=	Mittlere Anzahl der im Warterraum befindlichen FE, wenn der Warteprozess stationär geworden ist
W	=	Warterraum			
B	=	Bedienraum			
Q	=	Quelle	N_s	=	Mittlere Anzahl der im Wartesystem befindlichen FE (Warterraum und Bedienstation)
S	=	Senke			
λ	=	Ankunftsrate			
μ	=	Bedienrate			
a, b	=	Systemgrenzen			

Abb. 4.14 Einfaches Bediensystem (in Anlehnung an Arnold und Furmans 2009, S. 113)

Neben der Anzahl der parallelen Bedienstationen bestimmt das Einordnen in bzw. das Austreten aus einer Warteschlange, d. h. die Warte- oder Bedienungsdisziplin, die Art des Bediensystems. Bekannte *Warte- oder Bedienungsdisziplinen* (auch Prioritäts- oder Abfertigungsregeln genannt) sind First-In-First-Out (FIFO – First-In-First-Out) oder auch First-Come-First-Served (FCFS – First-Come-First-Served), Last-In-First-Out (LIFO – Last-In-First-Out), Shortest-Job-First (SJF – Shortest-Job-First), Shortest-Remaining-Processing-Time (SRPT – Shortest-Remaining-Processing-Time) oder die Bedienung nach Auftragsprioritäten (priority). Im Falle der

Vergabe von Prioritäten kann zwischen Aufträgen, die den Bedienprozess unterbrechen (preemptiv scheduling) und die diesen nicht unterbrechen, unterschieden werden. Bezuglich der *Struktureigenschaften* werden Bediensysteme als offen oder geschlossen bezeichnet. In offenen Bediensystemen ist die Anzahl der Aufträge bzw. Forderungen, die sich im System befinden, variabel (beispielsweise in Kaufhäusern oder Bahnhöfen mit einer variablen Anzahl an Kunden). Geschlossene Bediensysteme beinhalten eine konstante Anzahl von sich im System befindenden Aufträgen bzw. Forderungen. Hier sei beispielsweise die Reparatur von Maschinen, die zu zufälligen Zeitpunkten ausfallen, genannt. Detaillierte Darstellungen zum Einsatz der Warteschlangentheorie bei der Planung logistischer Systeme sind u. a. Arnold und Furmans (2009) sowie Furmans (2008) zu entnehmen.

Die Sichtweise eines Bediensystems hat sich auch zur Analyse und Darstellung des Auftragsdurchflusses in vernetzten Fertigungen bewährt. Als Beispiel ist das sogenannte Hannoversche Trichtermodell zu nennen (Nyhuis und Wiendahl 2003), dessen Prinzip der Abbildung 4.15 zu entnehmen ist.

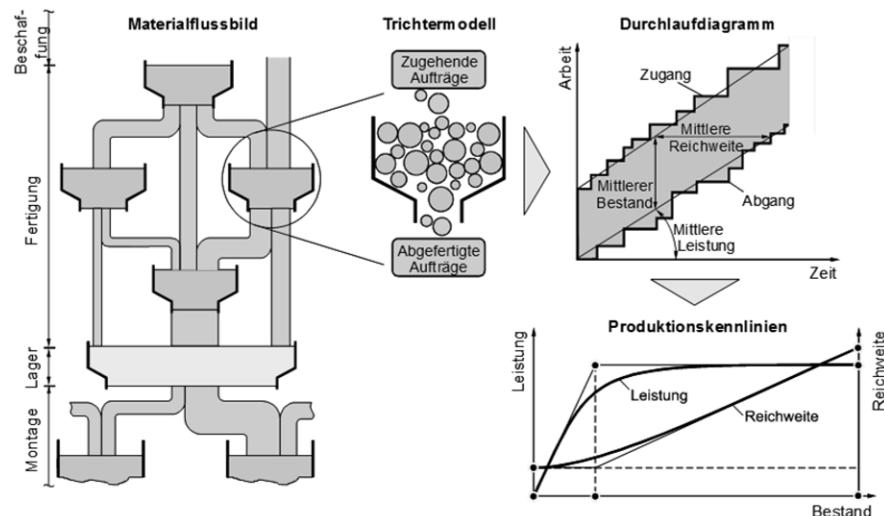


Abb. 4.15 Prinzip des Trichtermodells (nach Nyhuis und Wiendahl 2012, S. 25)

Jede Bedienstation im Materialflussbild wird durch einen Trichter repräsentiert, dessen Zugang und Abgang im Durchlaufdiagramm kumulativ aufgetragen werden. Die Variation des Bestandes führt zu den sogenannten Produktionskennlinien. Sie stellen den Verlauf der Reichweite und der

Leistung dar. Die Kennlinien finden Verwendung zur Analyse, Konfiguration und Verbesserung der Fertigungssteuerung. Ein Beispiel für die Konfiguration einer modernen Fertigungssteuerung nach diesen Prinzipien für die Industriekeramik zeigen Bracht und Arzberger (2015a) auf.

4.5.4 Vergleichende quantitative Bewertungsmethoden

Die Beurteilung und Auswahl von Lösungsvarianten (je nach Betrachtungsgegenstand kann es sich um Systeme, Planungsvarianten oder auch Werkzeuge, Angebote oder Anbieter handeln) sollte auf einer möglichst vergleichbaren quantitativen Bewertung basieren. Eine in diesem Zusammenhang häufig verwendete Methode stellt die *Nutzwertanalyse* dar. Sie kommt primär zum Einsatz, wenn multidimensionale Zielsetzungen bestehen und nicht alle Entscheidungskonsequenzen monetär quantifizierbar sind. Die Nutzwertanalyse versucht somit, laut einer Definition von Zangemeister (1976), eine Menge komplexer Handlungsalternativen zu analysieren, um sie entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers zu ordnen. In der Regel ist das durch den Entscheidungsträger vorgegebene Zielsystem multidimensional. Die Ordnung wird dadurch abgebildet, dass Nutzwerte zu den Alternativen angegeben werden.

Die Probleme bei der Anwendung der Nutzwertanalyse liegen allerdings in der subjektiven Beurteilung der Zielkriteriengewichtung und der Teilnutzenbestimmung, so dass nur eine vermeintlich objektive Bewertung vorliegt. Demgegenüber liegt der Nutzen dieser Methode in einem besser nachvollziehbaren und überprüfbaren Entscheidungsablauf.

Ausgehend von einer Bestimmung der zu bewertenden Zielkriterien durch ein Entscheidungsteam wird für jedes Kriterium eine Gewichtung vorgenommen. Die Gewichtung ist i. d. R eine subjektive Einschätzung der Bedeutung jedes einzelnen Kriteriums in Bezug zu den jeweils anderen Zielkriterien (relative Bedeutung eines jeden Kriteriums). Im Anschluss erfolgt eine Benotung der Zielkriterien für die Lösungsvarianten entsprechend des Erfüllungsgrades. Auf Basis dieser Benotung können dann der Teilnutzen durch Multiplikation der Benotung mit der Gewichtung für das Zielkriterium und der Gesamtnutzwert jeder Lösungsvariante durch Summation der mit den Gewichten multiplizierten Bewertungsnoten (vgl. beispielsweise Gudehus 2011, S. 95) ermittelt werden. Da geringe Veränderungen in der Benotung und Gewichtung oftmals zu einer veränderten Rangfolge der Lösungsvarianten führen, ist eine abschließende Sensitivitätsanalyse des Gesamtnutzwertes in Bezug auf Veränderungen bei der Benotung und der Gewichtung der wichtigsten Bewertungskriterien zweckmäßig. Nur dadurch erhält man ein Gefühl für die Tragfähigkeit und

Aussagekraft der eigentlichen Bewertung. Beispiele zur Anwendung der Nutzwertanalyse sind in Arnold und Furmans (2009, S. 276 ff.), Gudehus (2011, S. 1007 ff.) und Grundig (2015, S. 201 ff.) zu finden.

Methoden zur *Wirtschaftlichkeitsanalyse* von Lösungsvarianten beziehen sich im Wesentlichen auf die Investitionen, die Betriebskosten bzw. Leistungskosten (als anteilige Betriebskosten einer Leistungsstelle bezogen auf den Durchsatz der maßgebenden Leistungseinheit, nach Gudehus (2011, S. 113) sowie ggf. auf die Kapitalrückflussdauer oder auch die Amortisationszeit einer Investition. Ziel der Wirtschaftlichkeitsanalysen ist stets ein Vergleich der aufzuwendenden Investitionsausgaben mit den Einsparungen, zusätzlichen Einnahmen und Ausgaben, die während der Nutzungsdauer zu erwarten sind (vgl. Arnold und Furmans 2009, S. 284). Unterschieden werden statische und dynamische Methoden: Bei den dynamischen Methoden wird der zeitlich unterschiedliche Anfall von Ausgaben und Einnahmen innerhalb der Nutzungsdauer und die entsprechende Verzinsung berücksichtigt, während bei den statischen Methoden der Zeit-einfluss nicht in die Berechnung einfließt. Tabelle 4.2 stellt die unterschiedlichen Methoden im Überblick dar.

Tabelle 4.2 Methoden zur Wirtschaftlichkeitsanalyse im Vergleich (in Anlehnung an die Zusammenstellung aus Schack 2008, S. 114)

Art der Methode	Methode	Zielkriterium	Ausrichtung
statisch	Kostenvergleichsrechnung	Durchschnittliche periodenbezogene Kosten	Kostenminimierung
statisch	Gewinnvergleichsrechnung	Durchschnittliche periodenbezogene Gewinne	Gewinnmaximierung
statisch	Rentabilitätsrechnung	Verzinsung des eingesetzten Kapitals	Renditemaximierung
statisch	Amortisationsrechnung	Rücklaufzeit des eingesetzten Kapitals	Risikominimierung; Amortisationszeitminimierung
dynamisch	Interne Zinsflußmethode	Zinsen	Gewinnmaximierung
dynamisch	Kapitalwertmethode	Kapitalwert	Gewinnmaximierung
dynamisch	Endwertmethode	Kapitalendwert	Gewinnmaximierung
dynamisch	Dynamische Amortisationsrechnung (Annuitätenmethode)	Zeit, nach der eine Zahlungsreihe den Wert Null annimmt (Pay-off-Zeit)	Risikominimierung

Für eine Erläuterung der unterschiedlichen Methoden hinsichtlich ihrer mathematischen Zusammenhänge sei auf die einschlägige betriebswirtschaftliche Fachliteratur wie Wöhe und Döring (2016) verwiesen.

4.6 Simulationsmethoden

Im Gegensatz zu den statischen Analysemethoden kennzeichnet die Simulation eine Problemlösungsmethode zur Analyse komplexer *dynamischer* Sachzusammenhänge. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass mit ihr durch Experimente an Modellen Aussagen hinsichtlich des Verhaltens der durch die Modelle dargestellten Systeme über der Zeit gewonnen werden können. Ihre Anwendung und Verbreitung reichen von der Abbildung von Organisationsstrukturen, Arbeitsabläufen, funktionalen Zusammenhängen in Produktionsanlagen oder Rechnernetzen, über die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen bis hin zur Durchführung von Crashtests in der Automobilindustrie oder Vorhersage des Wetters.

Allgemein kann der Simulationsbegriff nach VDI 3633 Blatt 1 (2014) wie folgt definiert werden:

Simulation ist das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“ (VDI 3633 Blatt 1 2014, S. 3)

Als wesentliche Eigenschaften der Simulation sind die Modellierung der Zeit, die Möglichkeit zur Abbildung von zufälligen Ereignissen, die Experimentierbarkeit der Modelle über systematische Struktur- und Parametervariationen sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu sehen.

Zur Abbildung des Zeitverhaltens und zur Fortschreibung der Zeit innerhalb eines Simulationsmodells werden die kontinuierliche, die zeitgesteuerte und die ereignisdiskrete Simulation unterschieden. Bei der kontinuierlichen Simulation sind die Zeit sowie die Zustandsvariablen durch stetige Funktionen beschreibbar; bei der ereignisdiskreten Simulation entstehen Zustandsänderungen nur zu diskreten Zeitpunkten in Abhängigkeit vom Eintreten eines Ereignisses. Bei der zeitgesteuerten Simulation wird in jedem Simulationsschritt die Simulationszeit um einen festen Wert Δt erhöht (vgl. u. a. Mattern und Mehl 1989; Robinson 2004, S. 14). Schließt die Modellierung Zufälligkeiten aus, handelt es sich um deterministische Simulationsmodelle; stochastische Modelle hingegen berücksichtigen Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Systemzuständen, zufällige Än-

derungen von Parameterwerten (z. B. Störgrößen) oder Ankunftsverteilungen an Modellquellen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Simulationsmethoden mit ihren Anwendungen in der DF dargestellt. Hierbei werden jeweils kurze Erläuterungen zu den Methoden gegeben und die möglichen Einsatzfelder aufgezeigt. Zusätzliche Beispiele verdeutlichen die Methoden im Praxiseinsatz.

4.6.1 Kontinuierliche Simulation

Die Simulation kontinuierlicher Sachverhalte in *Raum* und/oder *Zeit* wird vor allem im physikalisch-technischen Bereich eingesetzt und dient der Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines technischen Systems. Sie basiert auf dem Gedanken, dass sich der Zustand eines Systems und damit auch eines Modells stetig mit der Zeit verändert. Neben der zeitlichen Dynamik kann je nach Aufgabenstellung auch die räumliche Dynamik von Bedeutung sein (beispielsweise bei der Simulation von Luftströmungen an Tragflügeln).

Die Modellierung des Systemverhaltens erfolgt in Form von (partiellen) Differentialgleichungen bzw. Differentialgleichungssystemen; die freie Variable ist die Zeit. Zur Lösung der Gleichungssysteme wird oftmals ein numerischer Ansatz der Diskretisierung verwendet. In Abhängigkeit von den jeweiligen Eigenschaften der zu untersuchenden dynamischen Systeme differieren die jeweilige Aufgabenstellung und damit die verwendbaren Modellierungsansätze. Nach der Art der Modellbildung werden als Ersatzmodelle Finite-Element-Modelle, Mehrkörpersysteme (als spezielle Form der Kinematikmodelle die Ergonomiemodelle) sowie kontinuierliche Systeme unterschieden. Die folgenden Abschnitte stellen die verschiedenen Modellierungsansätze im Einzelnen vor.

Finite-Element-Methode (FEM)

Ein in der Praxis häufig verwendeter Ansatz zur Diskretisierung stellt neben der Finite-Differenzen-Methode (FDM – Finite-Differenzen-Methode) und der Finite-Volumen-Methode (FVM – Finite-Volumen-Methode) insbesondere die FEM dar (vgl. beispielsweise Schäfer 1999). Letztere findet vor allem für numerische Berechnungen im strukturmechanischen Bereich, aber auch bei strömungsmechanischen Fragestellungen (numerische Strömungsmechanik – Computational Fluid Dynamics – CFD) ihre Anwendung. Als Ersatzmodelle werden massebehaftete elastische Körper zu-

grunde gelegt, auf die an diskreten Punkten (Knotenpunkten) Einzelkräfte wirken.

Bei der Finite-Element-Methode (FEM) erfolgt eine Diskretisierung des Problemgebiets über eine nicht überlappende Zerlegung des Gebietes in einfache Teilgebiete (sogenannte finite Elemente). In Abhängigkeit von der räumlichen Problemdimension wird die Geometrie des zu analysierenden Objektes über Elementtypen in 1D-Intervalle, in 2D-Dreiecke und -Vierecke sowie krummlinige Elemente und in 3D-Tetraeder, Quader sowie ebenfalls krummlinige Elemente zerlegt, die das reale Objekt näherungsweise abbilden. Für jedes finite Element erfolgt dann die Festlegung polynomialer Ansatzfunktionen.

Je nach Simulationsart werden an den Knoten bzw. Kanten der Elemente physikalische Eigenschaften des Materials wie seine Biegesteifigkeit, sein Wärmeleitverhalten oder sein Fließverhalten definiert. Im Simulationsverlauf verändert sich das Netz aufgrund äußerer Einwirkungen in unterschiedlichen Größen, wie der Position eines Knotens, der Länge einer Kante, des Drucks oder der Temperatur in einem Element.

Die FEM findet ihre Anwendung in Einsatzgebieten, in denen die Untersuchung von Bauteilen in Bezug auf die Festigkeit und die Verformung unter Last eine wesentliche Rolle spielt. Weiterhin ist das Verhalten von Werkstoffen insbesondere in direkter Beziehung zum Fertigungsprozess von Interesse.

Weit fortgeschritten in diesem Zusammenhang ist die *Simulation des Tiefziehens*, bei dem die einzelnen Umformschritte eines Bleches in einer Presse so festgelegt werden, dass keine Reißer oder Falten entstehen (siehe auch Abb. 4.16). Bei dieser Simulation wird auch der optimale Zuschnitt der Blechplatine ermittelt.

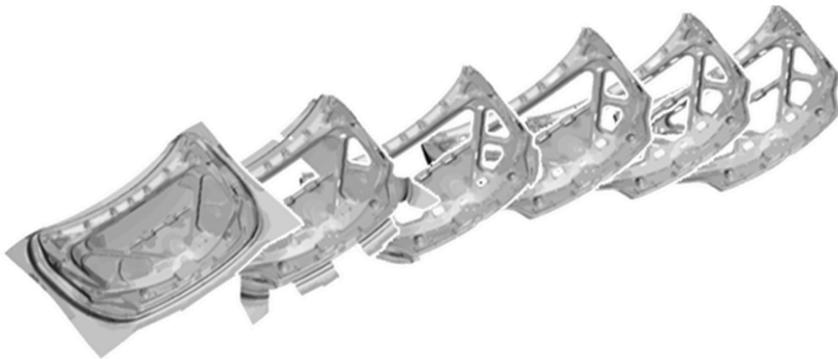


Abb. 4.16 Simulation des Tiefziehvorgangs einer Motorhaube in sechs Stufen
(Quelle: Volkswagen AG)

Auch die *Simulation von Gießprozessen*, die das Erstarren des flüssigen Metalls in der Gussform nachbildet, hat sich in der Praxis bewährt. Ein zweiter Untersuchungsspekt ist die Schrumpfung des Materials nach der Abkühlung. Dadurch kann das erforderliche Aufmaß exakt ermittelt werden.

Eine besondere Problematik der FEM entsteht bei der *spanenden Bearbeitung*, da sich der Aufbau des Gitternetzes des Werkstoffes an der Werkzeugeingriffsstelle in seiner Struktur verändert. Von Interesse sind hier die Analysen zur Veränderung des Werkstücks durch den Bearbeitungsprozess, die Ermittlung von optimaler Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe sowie die Berechnung der Standzeit des Werkzeugs durch Verschleiß der Schneidekante oder die Bildung einer Aufbauschneide.

Bei *Lackierverfahren* ist die Analyse von Tauchlackprozessen, bei denen die Lackbenetzung des Produktes, die Bildung von Luftblasen im Tauchvorgang sowie der Ablauf der Flüssigkeit nach dem Tauchprozess besonders interessant (vgl. auch Abschnitt 2.2.2, Abb. 2.9). Bei Sprühlackprozessen stehen die Erreichbarkeit schwer zugänglicher Stellen, die Verteilung des Farbauftrags sowie die Verwirbelung der Lackwolke im Simulationsfokus. Bei Trocknungsprozessen wird beispielsweise untersucht, ob die aufgetragene Farbe vollständig austrocknet, ohne dass dabei die maximal zulässige Erwärmung des Produktes überschritten wird, oder ob Verformungen entstehen (siehe Abb. 4.17).

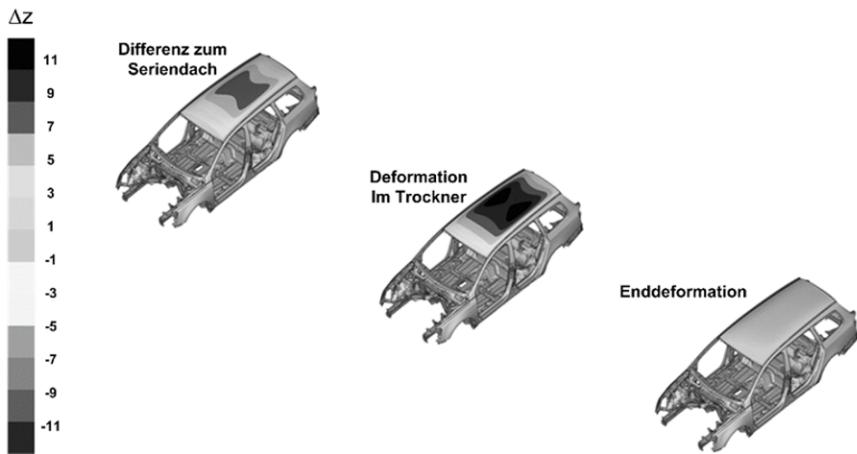


Abb. 4.17 Simulation des Verformungsprozesses während der Lacktrocknung (Quelle: Volkswagen AG) (Legende: Δz – Verformung in z-Richtung in mm)

Bei *Fügeverfahren* wie Schraub- oder Schweißverbindungen ergeben sich beim vorbereitenden Greifen, Spannen oder dem Fügeprozess selbst Verspannungen, die zu Toleranz- oder Materialänderungen führen können. Simuliert man diese Veränderungen, so können die Einzelteile mit einem Aufmaß gefertigt werden, das diese Verformungen vorwegnimmt. Das Endmaß wird dann nach dem Fügeprozess erreicht (vgl. auch Abschnitt 2.2.3).

Mehrkörpersimulation

Die Mehrkörpersimulation (vgl. Schiehlen und Eberhard 2004; Shabana 2013) basiert auf der Verwendung von Mehrkörpersystemen als Ersatzmodell.

Mehrkörpersysteme bestehen aus starren oder elastischen Körpern oder auch Komponenten, auf die Kräfte infolge von Federn, Dämpfern und Stellmotoren sowie infolge von Gelenken einwirken. Die Bewegung der Einzelkomponenten ist kinematisch aufgrund von Verbindungen der Einzelkomponenten untereinander eingeschränkt. Jede Einzelkomponente kann aufgrund ihrer Freiheitsgrade unterschiedlichen translatorischen und rotatorischen Bewegungsabläufen folgen.

Beispiele für physikalische oder mechanische Systeme, die über Mehrkörpersimulation analysiert werden, sind Maschinen, Fahr- und Flugzeuge

oder auch Roboterbewegungen. Basis der Kinematikanalysen sind in der Regel die vorliegenden digitalen Produktdaten. Anhand der Kinematiksimulation wird zunächst visuell überprüft, ob alle Bewegungsabläufe korrekt sind. Eventuelle Probleme werden durch die Kinematikdefinition korrigiert.

Der große Nutzen der Kinematiksimulation besteht darin, dass alle Betriebsmittel, Anlagen und Werkzeuge nach erfolgreicher Durchführung geometrisch korrekt gestaltet und positioniert sind. Ohne eine solche Simulation tritt es häufig auf, dass Kollisionen und Unerreichbarkeiten erst bei der Inbetriebnahme erkannt werden, was zu erheblichen Mehrkosten und zeitlichen Verzögerungen führen kann. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass Steuerungen von Robotern oder NC-Maschinen aus der Kinematiksimulation direkt abgeleitet werden können. Diese Offline-Programmierung führt zu einer weiteren Zeiteinsparung beim Inbetriebnahmeprozess.

Als Beispiel sei der Einsatz von Robotern in der Karosseriebaufertigung der Volkswagen AG in Wolfsburg genannt (siehe Abb. 4.18). Im Rahmen der Konstruktion wird für die Baugruppen der Karosserie festgelegt, welche Teile mit welcher Verbindungstechnik zusammengefügt werden. Dies können Schweißpunkte oder -nähte, Nietverbindungen, Clinchverbindungen, aber auch Klebetechniken sein (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.2.3, Abb. 2.10 und 2.11). Alle Verbindungen einer Baugruppe werden in einem Fügeplan zusammengeführt. Dieser enthält die Fügetechnik, Geometrie- und dazugehörigen Fertigungsdaten und ist bei modernen CAD-Systemen direkt im CAD-Modell integriert. Aufbauend auf diesem Plan wird die Fügefolge bestimmt. Dabei wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Blechteile gefügt werden. Je nach Fertigungsstückzahl, vorhandenem Platz und der Nutzung vorhandener Einrichtungen können sich dabei unterschiedliche optimale Reihenfolgen in der Verbauung der Einzelteile an den verschiedenen Fertigungsstandorten ergeben. Damit entstehen unterschiedliche Zwischenbaugruppen und Gliederungen im Strukturbau der Fertigungsstückliste.

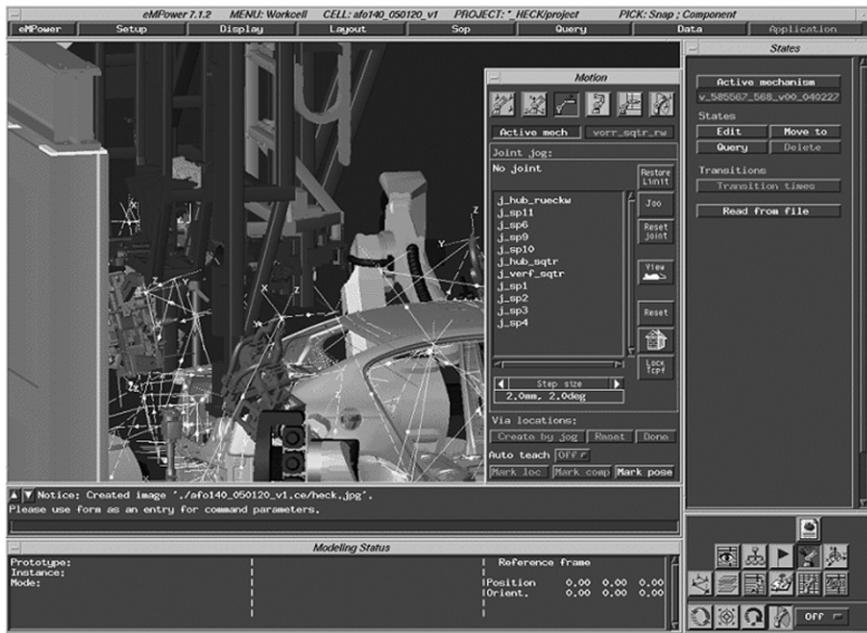


Abb. 4.18 Definition von Bewegungspfaden in einer Karosseriebauanlage als Basis einer Kinematiksimulation (Quelle: Volkswagen AG)

Der eigentliche Fügeprozess, wie das Schweißen oder Nieten, wird von Robotern ausgeführt. Aber auch das Einlegen der Blechteile in die Formrahmen und die Weitergabe an die nächste Bearbeitungsstation erfolgen meist mit automatischen Handhabungsgeräten. Mithilfe der Robotersimulation werden die Erreichbarkeit aller Fügestellen und eventuelle Kollisionen bewegter Elemente mit dem Produkt oder mit Anlagenteilen oder anderen beweglichen Betriebsmitteln untersucht (Abb. 4.19).

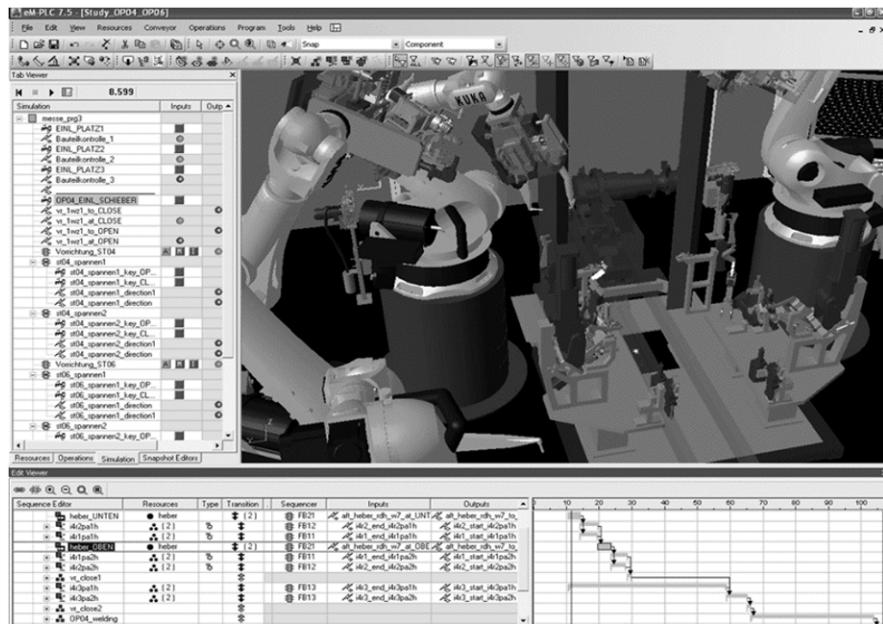


Abb. 4.19 Definition und Prüfung von Roboterbewegungen anhand eines Gantt-Charts, das die einzelnen Bewegungsschritte beschreibt (Quelle: Volkswagen AG)

Auch die Lackierereiplanung nutzt für die Endlackierung (einschließlich der Aufbringung von Schutzlack und Versiegelung) die Simulation der Lackierroboter mit Kinematikuntersuchungen und Offline-Programmierung.

Ergonomiesimulation

Eine spezielle Form der Kinematiksimulation ist die Simulation am Modell eines bewegten Menschen, um ergonomische Untersuchungen zu ermöglichen. Je nach Fragestellung stehen Menschmodelle (vgl. auch Zülch 2010b) unterschiedlicher Größe, Gewicht und Geschlecht zur Verfügung (anthropometrische Simulation). Diese Sichtweise geht über die Simulation des Personaleinsatzes, die den Menschen als eine leistungserbringende Ressource innerhalb einer Ablaufsimulation betrachtet, und über die *personalorientierte Simulation*, die eine Analyse von Arbeitsformen und -bedingungen und deren Auswirkungen auf das Produktionsergebnis zum Ziel hat, hinaus (vgl. VDI 4499 Blatt 4 2015).

Bei der Ergonomiesimulation ist der Mensch mit seinen physischen und psychischen Eigenschaften Gegenstand der Betrachtung und

kann hinsichtlich Belastung und Beanspruchung analysiert werden. Auf der Basis definierter Arbeitsabläufe und anhand von Bewegungen, körpereigenen Belastungen und bewegten Gewichten lässt sich z. B. die Beanspruchung in den einzelnen Körperteilen messen und mit Grenzwerten vergleichen.

Die Ergonomiesimulation wird häufig bei problematischen Bewegungsabläufen (z. B. in engen oder schlecht zugänglichen Räumen) oder in Extremsituationen eingesetzt und kann als Basis für Entscheidungen zur Durchführbarkeit mit dem Betriebsrat und den Gesundheitsschutz herangezogen werden (vgl. auch Abschnitt 2.2.3, Abb. 2.13).

Insbesondere bei umfangreichen manuellen Arbeitsinhalten mit ggf. kritischen Bewegungsabläufen erfolgt eine ergonomische Ausplanung, in der die Bewegungsabläufe, die körperlichen Belastungen sowie die zurückgelegten Wege beispielsweise bei der Verfolgung der Fahrzeuge am Band und der Versorgung der Werker mit Material berücksichtigt werden. Als Beispiel sei die Arbeitsplatzgestaltung in der Motorendemontage mit Hilfe einer ergonomischen Simulationsanalyse genannt (vgl. Pfitzmann 2007). Die Untersuchung umfasst die Analyse und Generierung ergonomischer Umgestaltungsmaßnahmen an der Abrüststrecke und Teilen des Plattenbandes im Bereich der manuellen Motorendemontage. Der bestehende Arbeitsprozess wird mit Hilfe von Videoaufzeichnungen erfasst; ergänzend werden ergonomisch bedenkliche Tätigkeitsbereiche mithilfe eines Simulationswerkzeugs analysiert.



Abb. 4.20 Videoaufzeichnung und Ergonomiemodell (Pfitzmann 2007, S. 239)

Abbildung 4.20 stellt links die Körperhaltung bei derzeitiger Arbeitsweise im Realsystem dar. Das rechte Bild zeigt die Körperhaltungsanalyse mit Hilfe eines Ergonomiesimulationsmodells.

Im Rahmen der in Pfitzmann (2007) beschriebenen Untersuchung wurde die Ergonomiesimulation in Ergänzung zu konventionellen Verfahren wie dem OWAS-Verfahren (OVAKO-Working-Posture-Analysing-System, vgl. Karhu et al. 1977) eingesetzt, das nach dem finnischen Unternehmen OVAKO benannt ist und zur Bewertung von Arbeitsplätzen hinsichtlich der Arbeitszeitanteile in verschiedenen Körperhaltungsklassen dient. Der ergänzende Einsatz unterschiedlicher Methoden erlaubt die Entwicklung konkreter Verbesserungsvorschläge für das bestehende Arbeitssystem, die bei Umsetzung zu einer erheblichen Belastungsreduzierung beim Personal führen.

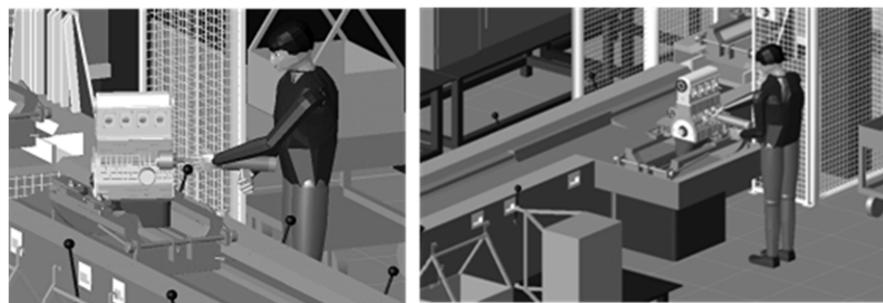


Abb. 4.21 Ergebnisse einer Ergonomieuntersuchung: (links) Realisierbare Körperhaltung ohne Modifikation der Schlitten (Drehung des Motors um 70°) – (rechts) Zusätzlicher Tisch an der Abrüststrecke (Pfitzmann 2007, S. 239)

Abbildung 4.21 verdeutlicht die Einführung eines zusätzlichen Tisches an der Abrüststrecke als ein Ergebnis der Ergonomieuntersuchung.

Neben dem Einsatz von Ergonomiemodellen zur Systemanalyse, -gestaltung und -bewertung lassen sich Menschmodelle nutzen, um vor dem Bau der realen manuell bedienten Arbeitsstationen aussagekräftige Schulungsunterlagen zu erstellen und somit die Beschäftigten rechtzeitig vor Fertigungsbeginn in den durchzuführenden Bewegungsabläufen zu schulen. Der Einsatz von Menschmodellen im Rahmen der DF wird ausführlich in der VDI 4499 Blatt 4 (2015) beschrieben.

Kontinuierliche Systeme

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Modellierungsansätzen wird bei einer kontinuierlichen Simulation *kontinuierlicher Systeme* das Verhalten ohne eine zwingende zusätzliche Raumdimension, d. h. ohne eine komplexe räumliche Dynamik, betrachtet. Ein Beispiel sind Strömungsuntersuchungen mit Hilfe von CFD (Computational Fluid Dynamics). Untersu-

chungsschwerpunkte kontinuierlicher Systeme beziehen sich auf flussorientierte Fragestellungen innerhalb volkswirtschaftlicher Analysen, Stoffstromkreisläufen und umwelttechnischer Sachzusammenhänge. Als Beispiele sind hier u. a. die Wärmesimulation und die Lärmentwicklung zu nennen.

Das Ziel von *Wärmesimulationen* ist z. B. eine wirtschaftlich günstige Positionierung von Heizungen, Lüftern oder Kühleinrichtungen in einem Raum, um ein angenehmes Raumklima zu erreichen. Dabei wird neben den direkten Heizungseinrichtungen auch die indirekte Wärmeentwicklung von Maschinen, Aggregaten oder sonstigen Anlagen berücksichtigt. Durch die Simulation der Luftströme ergibt sich ein Gesamtbild der Wärmesituation in einer Fertigungshalle. Unter Verwendung von Wärmebildkameras lässt sich das Ergebnis der Simulationsrechnung in der realen Halle überprüfen.

Die thermisch-energetische Gebäudesimulation behandelt die Berechnung der Raumreaktion unter Berücksichtigung aller Einflüsse wie Außenklima, Innenlasten, Verkehrs- und Betriebszeiten. Im Gegensatz dazu beschäftigt sich die thermisch-energetische Anlagensimulation mit dem Verhalten von Heiz- oder raumluftechnischen Anlagen aufgrund der durchgeführten Gebäudesimulation (vgl. VDI 6020 2016).

Ziel der *Geräuschsimulation* (NVH – Noise Vibration Harshness) ist die effiziente und effektive Positionierung von Schallschutzeinrichtungen wie Dämmkabinen oder Lärmwänden. Ausgangsparameter ist die Lärmentwicklung an Maschinen und Anlagen; Ergebnis der Simulation ist eine Lärmniveau-Karte. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Untersuchung der akustischen Wirkung von Alarmanlagen, Signalen oder sprachgestützten Informationssystemen.

4.6.2 Zeitgesteuerte (zeitdiskrete) Simulation

Im Gegensatz zur zeitkontinuierlichen Simulation geht die zeitgesteuerte Simulation davon aus, dass in jedem Simulationsschritt eine Erhöhung der Simulationszeit um ein „vorher festgelegtes konstantes Zeitinkrement Δt “ (vgl. Mattern und Mehl 1989, S. 202) erfolgt. Alle innerhalb des jeweils letzten Zeitinkrementes aufgetretenen Zustandsänderungen werden nach der Weiterschaltung der Zeit um den Betrag Δt durchgeführt. Die Dauer des Zeitinkrementes trägt entscheidend zur Leistung (Performance) sowie zur Korrektheit und Genauigkeit der Simulation bei. Ein zu kleines Δt verringert die Performance und erhöht damit die Rechenzeit. Es ist insbesondere bei langen Totzeiten (Zeiten ohne Zustandsänderungen) wenig sinnvoll. Ein zu großes Δt kann zu Genauigkeitsverlusten und Fehlern in der

Simulation führen, wenn Wechselwirkungen zwischen Zustandsänderungen innerhalb eines Zeitinkrementes bestehen. Wird das Δt sehr klein, spricht man auch von einer quasi-kontinuierlichen Simulation.

Anwendungen für die zeitgesteuerte Simulation sind immer dann zu finden, wenn die Betrachtung von Einzelereignissen für den Betrachtungsgegenstand nicht machbar und eine kontinuierliche Simulation aufgrund der zu betrachtenden Zustandsänderungen zu diskreten Zeitabständen nicht notwendig ist.

Typische Beispiele sind volkswirtschaftliche Fragestellungen oder auch logistische Material- und Energieströme oftmals auch im Zusammenspiel mit diskreten Produktionsanlagen. Die Untersuchung von energieeffizienten Produktionsprozessen über die Kopplung einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation mit einer thermischen Gebäudesimulation unter Berücksichtigung der Stoff- und Energieflusssimulation der Maschinen wird beispielsweise in Junge (2007) behandelt.

4.6.3 Ereignisdiskrete (Ablauf-)Simulation

Die ereignisdiskrete Simulation (Discrete Event Simulation, DES, vgl. u. a. Law 2015; Pidd 2004; Robinson 2004) unterscheidet sich von der kontinuierlichen Simulation durch die Abbildung des Zeitfortschritts über atomare Ereignisse, die einen Zustandswechsel auslösen.

Die abzuarbeitenden Ereignisse werden mit einem Zeitstempel in einer Ereignisliste verwaltet, die Simulationszeit wird entsprechend dem Zeitstempel des ersten Ereignisses in der Liste gesetzt, und das Ereignis wird abgearbeitet (vgl. Abb. 4.22). Auf diese Weise lassen sich Systeme mit diskreten beweglichen Objekten wie Materialfluss- oder Produktionssystemen sehr gut abbilden.

Der Begriff der ereignisdiskreten Simulation wird in der deutschsprachigen Literatur häufig auch als Ablaufsimulation bezeichnet. Ebenfalls üblich ist der Begriff Materialflusssimulation; dieser schränkt allerdings fälschlicherweise bereits auf den Betrachtungsgegenstand des Materialflusses ein und soll daher hier nicht als Synonym verwendet werden.

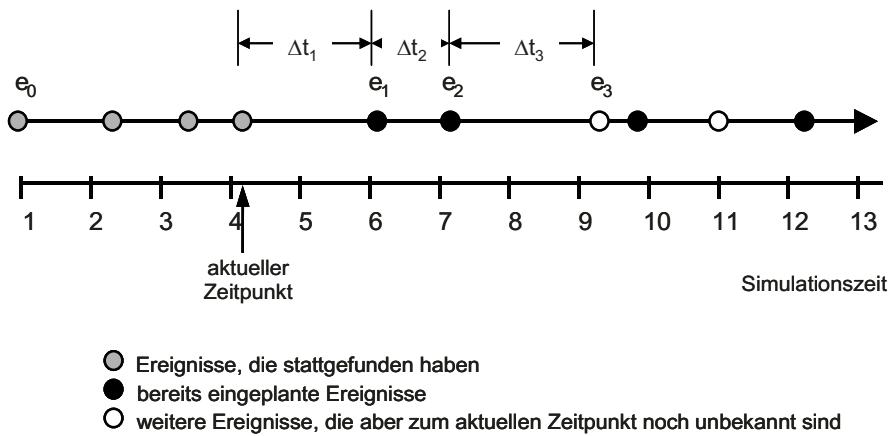


Abb. 4.22 Einordnung von Ereignissen in Abhängigkeit von der Simulationszeit (in Anlehnung an Mattern und Mehl 1989, S. 201)

Die Ablausimulation untersucht logistische Prozesse, Materialflüsse, Produktionsprozesse und ihre Auslegung sowie die Leistung der Produktionsysteme (vgl. u. a. VDI 3633 Blatt 1 2014; Kuhn und Wenzel 2008). Ihre Anwendungsbereiche reichen somit von der Betrachtung innerbetrieblicher Logistikabläufe im Sinne des klassischen Materialflusses über die Produktionslogistik bis hin zur Beschaffungs- und Distributionslogistik, bei denen eher die Analyse unternehmensübergreifender logistischer Material- und Informationsflüsse im Vordergrund steht. Auch unternehmensübergreifende Logistiknetze können Betrachtungsgegenstand der Untersuchungen sein, um beispielsweise werksübergreifende Verkehre zu analysieren und zu quantifizieren (vgl. auch Bracht und Ostermann 2003).

Die möglichen Ebenen der Betrachtung eines Systems verdeutlicht Abbildung 4.23 am Beispiel einer Fabriksimulation für die Automobilindustrie. Je nach Ebene sind unterschiedliche Zielgrößen im Rahmen der Simulation zu ermitteln. Auf den Ebenen der Anlagen und Produktionsbereiche sind u. a. Pufferdimensionierungen und Leistungsdaten der Maschinen zu bewerten sowie Taktzeiten, Zwischenpuffer oder Losgrößen zu variieren, um Produktionszeiten zu ermitteln und Transport- und Materialkosten zu reduzieren. Auf Werk- oder Konzernebene lassen sich Materialflüsse auslegen und Netzstrukturen bewerten.

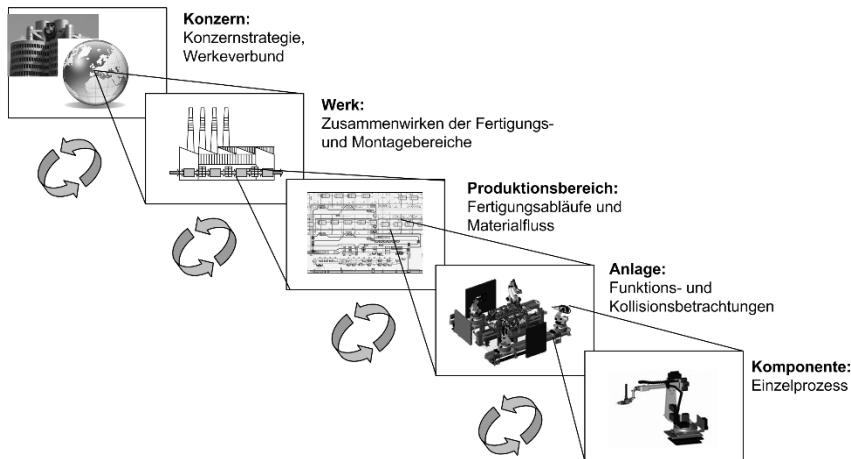


Abb. 4.23 Das Ebenenbild der Fabriksimulation (nach Bracht und Hagemann 1998, S. 346)

Je nach Ebene und Komplexität des Betrachtungsgegenstandes verändert sich der Detaillierungsgrad der Simulationsmodelle, d. h. die Abbildungstiefe der Modellierung (vgl. auch VDI 3633 Blatt 1 2014). Der Detaillierungsgrad kann dabei die Sichtweise auf die Realität und damit die Modellerstellung beeinflussen, die entweder basierend auf einem technischen Layout (aufbauorganisatorische Sicht) oder über die Prozesse, d. h. die Ablauforganisation, erfolgen kann. Bei einer hierarchischen Modellierung können die Charakteristika der Ebenen durch entsprechende Abstraktion/Detaillierung ineinander überführt werden.

Je nach Sichtweise kann eine symbolische oder auch eine realitätsnahe 2D- oder auch 3D-Darstellung für das Simulationsmodell zweckmäßig sein. Abbildung 4.24 verdeutlicht anhand eines Simulationsmodells für eine Produktionsanlage mit fahrerlosem Transportsystem, Fördertechnik und Hochregallager eine 2D- und 3D-Visualisierung. Darüber hinaus kann die Komplexität der Modelle zum Teil eine maßstabsgetreue Darstellung der Symbole unter Zuhilfenahme layoutnaher Visualisierungen bedingen. Abbildung 4.25 zeigt ein Simulationsmodell, das zum besseren Verständnis für den Betrachter auf ein 2D-Layout projiziert wurde.

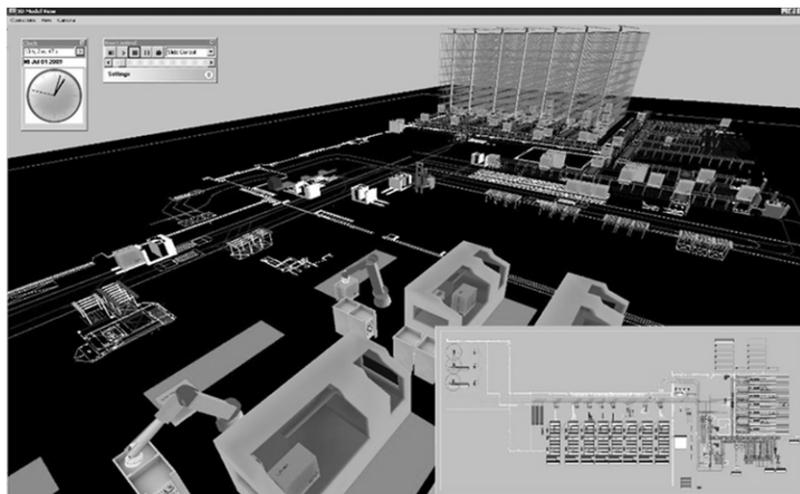


Abb. 4.24 2D- und 3D-Ansicht eines Simulationsmodells einer Produktionsanlage mit fahrerlosem Transportsystem, Fördertechnik und Hochregallager in Enterprise Dynamics (Quelle: INCONTROL Simulation Solutions, Wiesbaden)

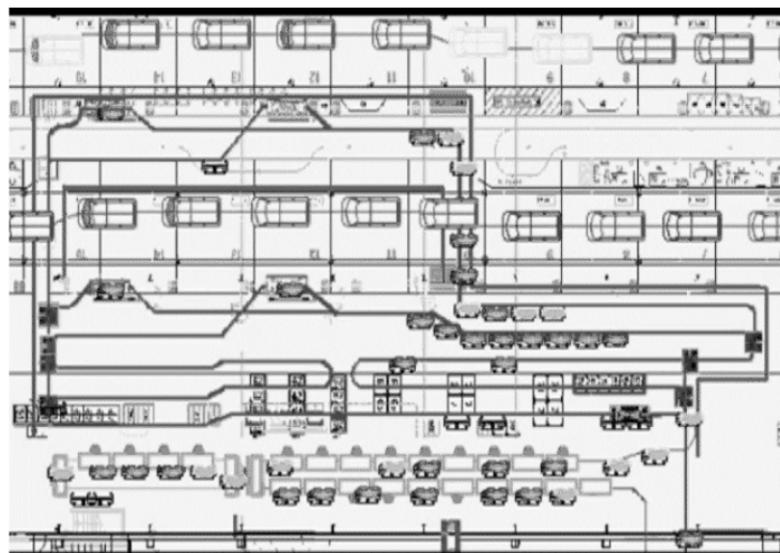


Abb. 4.25 Symbolische Darstellung eines Simulationsmodells kombiniert mit einem 2D-Layout (Quelle: Volkswagen AG)

Für die Nutzung der Simulation im Rahmen des operativen Fabrikbetriebs müssen die Werkzeuge der ereignisdiskreten Simulation eine einfache Ankopplung an Planungs- und Steuerungswerkzeuge zulassen. Damit wird es auch notwendig, ungeschultem Personal aus den operativen Unternehmensbereichen einen Zugang zu Simulationsmodellen zu ermöglichen, um den Fabrikbetrieb sowie die kurz- und mittelfristige Auftragsdisposition mit Simulationsszenarien zu unterstützen (vgl. auch Masurat et al. 2004).

Ausführliche Darstellungen zur ereignisdiskreten Simulation in Produktion und Logistik sind u. a. in Kuhn und Wenzel (2008), in den Richtlinienblättern zur VDI 3633, Wenzel et al. (2008), Rabe et al. (2008) oder für den Bereich Personal auch in Zülch (2010a) zu finden.

4.7 Methoden der künstlichen Intelligenz

Aufgrund der Komplexität großer Produktionsanlagen, dem Wunsch nach einer vollständigen Simulation eines ganzen Automobilwerks oder auch aufgrund der Tatsache, dass moderne Materialflussteuerungen eine stärkere Autonomie einzelner Objekte zulassen, werden inzwischen auch Methoden der künstlichen Intelligenz (KI – künstliche Intelligenz) – teilweise in Ergänzung zu den oben beschriebenen Simulationsmethoden – eingesetzt, um das dynamische Systemverhalten zu analysieren.

4.7.1 Multiagentensysteme MAS

MAS eröffnen ergänzend zur klassischen ereignisdiskreten Simulation neue Möglichkeiten der Modellierung agentenbasierter Systeme und Steuerungen. Sie basiert auf dem Konzept der im Bereich der KI entwickelten intelligenten Softwareagenten (vgl. Murch und Johnson 1999).

Ein Softwareagent kann als ein System bezeichnet werden, das sich in einer Umgebung mit anderen Agenten befindet und Teil dieser Umgebung ist, diese Umgebung wahrnimmt und darin autonom handelt, während es seine eigenen Ziele verfolgt und somit seine zukünftige Wahrnehmung beeinflusst (vgl. hierzu Graesser und Franklin 1996).

Ein Agent ist sozialfähig, d. h. er verhält sich interaktiv und kooperativ zu anderen Agenten, ist durch ein reaktives Verhalten gekennzeichnet (Aufnahme von Änderungen aus der Umwelt und Reaktion) und gleichzei-

tig pro-aktiv in seiner Verhaltensweise, da er zielorientiert handelt und in Eigeninitiative seine Ziele verfolgt (vgl. auch Toledo Muñoz 2006). MAS umfassen mehrere miteinander kommunizierende und kooperierende Agenten, die jeweils für sich nicht alle notwendigen Fähigkeiten besitzen, um ein Problem zu lösen. Die Problemlösung erfolgt über die Verteilung von Teilaufgaben entsprechend der Einzelfähigkeiten (Burkhard 2003).

Agentensysteme finden beispielsweise in der Fertigungssteuerung (Bussmann 1998), bei der Fahrerassistenz (Göriz 2003) und der Fahrzeugsteuerung (Lemmer et al. 2001) ihren Einsatz. Ein interessantes Konzept zum Einsatz von Softwareagenten zur Konstruktionsunterstützung im Produktentstehungsprozess wird in Toledo Muñoz et al. (2005) vorgestellt. Das Agentensystem wird in Ergänzung zum Konstrukteur bei Bedarf einzbezogen. Da die Abhängigkeiten zwischen den Baugruppen nicht fest vorgegeben sein müssen, kann die Suche nach kompatiblen Teilen zum Verbinden selbstständig erfolgen. Durch eine einfachere Konfiguration wird der Integrationsaufwand neuer Baugruppen in das Fahrzeugmodell erheblich reduziert.

Weitere Beispiele zum Einsatz von MAS finden sich beispielsweise bei der Analyse von Routing-Algorithmen für Flughafengepäckförderanlagen wie in Roidl und Follert (2007) dargestellt oder auch beim Management von Transportprozessen in logistischen Netzwerken (vgl. beispielsweise Pawlaszczyk 2006).

Die genannten Einsatzfelder sind teilweise noch im Forschungs- und Prototypenstadium. Eine stärkere Verbreitung von MAS ist im Rahmen von Industrie 4.0 zu erwarten.

4.7.2 Neuronale Netze

Eine sinnvolle Alternative zur ereignisdiskreten Simulation können bei sehr komplexen Untersuchungsgegenständen im Rahmen der DF, wie beispielsweise einem gesamten Automobilwerk, künstliche neuronale Netze (KNN – künstliche neuronale Netze) sein. KNN stellen eine Verfahrensklasse innerhalb der KI dar. Innerhalb dieser Verfahrensklasse existieren unterschiedliche Verfahren, die Poding und Sidorovitch (2001) in überwachte Lernverfahren (Funktionsapproximation, Klassifikation, Assoziativspeicher mit ihren jeweiligen Ausprägungen) und unüberwachte Lernverfahren unterteilen. Eine ausführliche Darstellung der KNN findet sich beispielsweise bei Zell (1994) und Poding und Sidorovitch (2001).

Ein künstliches neuronales Netz (KNN) ist eine in der Informatik übliche Bezeichnung für „informationsverarbeitende Systeme, die

aus einer großen Anzahl einfacher Einheiten (Zellen, Neuronen) bestehen, die sich Informationen in Form der Aktivierung der Zellen über gerichtete Verbindungen [...] zusenden.“ (Zell 1994, S. 23). KNN lehnen sich in ihrer Funktionsweise an die Arbeitsweise des menschlichen Gehirns an.

KNN zeichnen sich durch ihre Lernfähigkeit aus und sind in der Lage, über geeignete Rückkopplungen Lernprozesse selbst zu organisieren und damit komplizierte (gerichtete) Relationen zwischen Ein- und Ausgabe darzustellen. Weitere wichtige Eigenschaften sind Parallelität, verteilte Wissensrepräsentation, hohe Fehlertoleranz, assoziative Speicherung von Information oder auch die Robustheit gegen Störungen oder verrauschte Daten (zu weiteren Eigenschaften von KNN sei auf Zell 1994, S. 26 ff. verwiesen).

Klassische Anwendungsgebiete der neuronalen Netze sind u. a. Robotik, Sprach- und Bildverarbeitung, aber auch die Betriebswirtschaft. Darüber hinaus werden neuronale Netze immer stärker zur Lösung von Problemen eingesetzt, die aufgrund ihrer Komplexität analytisch schwer beschreibbar sind und stark parallele Informationsverarbeitungsprozesse zur Problemlösung erfordern.

Im Rahmen von Fragestellungen zur DF hat Ostermann (2001) den Einsatz von neuronalen Netzen bei der Untersuchung eines Automobilwerks analysiert. Er bildet die einzelnen Fertigungszellen in neuronalen Netzen ab und trainiert sie durch Einzelsimulationen, so dass sie ein Abbild des möglichen Verhaltens der Einzelzellen wiedergeben. In einer übergeordneten Simulation werden die einzelnen neuronalen Netze miteinander verknüpft und zeigen so das Verhalten der gesamten Fabrik. Auf diese Weise lassen sich sowohl die Gesamtausbringung eines Werkes simulieren als auch die Durchlaufwege und -zeiten einzelner Produkte verfolgen. Man erhält Aussagen über die durchschnittliche oder wahrscheinliche Lieferzeit einzelner Produkte.

Zwar lassen sich mit neuronalen Netzen Verhaltensweisen nachbilden und in Bezug auf ihre Wirkung bewerten, die Ursachen für die Verhaltensweisen können allerdings mit neuronalen Netzen nur bedingt analysiert werden.

4.8 Visualisierungsmethoden

Die Visualisierung von Daten und Sachverhalten ist eine wichtige Voraussetzung zur Wissensvermittlung und zwischenmenschlichen Kommunikation; sie durchdringt alle wissenschaftlichen Disziplinen und Bereiche des

täglichen Lebens. Visualisierungen können manuell erzeugt oder computergeneriert sein und reichen von einfachen Strichzeichnungen, über Business Grafiken bis hin zu vollständig computeranimierten dreidimensionalen Kinofilmen.

Diesem allgemeinen Begriffsverständnis entspricht auch die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 11 (2009) mit folgender Definition:

„Die Visualisierung umfasst die Erzeugung der grafischen Veranschaulichung von Daten und Sachverhalten durch Transformation der Daten in symbolische und geometrische Information; sie muss nicht zwangsläufig computerbasiert sein.“ (vgl. VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3)

Damit stellt die Visualisierung den Oberbegriff aller Formen der visuellen Veranschaulichung von Daten dar und subsumiert die Darstellung statischer grafischer Modelle ebenso wie zwei- oder dreidimensionale Animationen. Die einsetzbaren Visualisierungsmethoden unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Dimensionalität, ihren jeweiligen Darstellungsmöglichkeiten (Repräsentation und Darstellungsform), ihrer grafischen Aufbereitung (Skalierung und Projektion), der Zeitrepräsentation sowie den Präsentations- und Interaktionsmöglichkeiten. Eine detaillierte Erläuterung der Klassifikationskriterien ist in Bernhard und Wenzel (2004) sowie – auf den Einsatz von Visualisierungsmethoden für die ereignisdiskrete Simulation bezogen – in VDI 3633 Blatt 11 (2009) zu finden.

Der morphologische Kasten (siehe Abb. 4.26) erlaubt einem Anwender, auf der einen Seite den Bedarf an eine Visualisierungsmethode nach den aufgeführten Kriterien zu ermitteln und auf der anderen Seite die Methode selbst zu bewerten und einzurordnen sowie Klassen von Visualisierungsmethoden ähnlicher Funktions- und Leistungsfähigkeit zu bilden. Auf diese Weise lassen sich Visualisierungsmethoden für ihren Einsatz bezüglich einer gegebenen Aufgabenstellung vergleichen. Die Auswahl einer Visualisierungsmethode sollte dabei unter Berücksichtigung der *Expressivität* (unverfälschte Wiedergabe der in den Daten enthaltenen Informationen), *Effektivität* (Wahl einer geeigneten Methode, die die Information so vermittelt, das diese intuitiv vom Betrachter verstanden wird) und *Angemessenheit* (Relation zwischen Aufwand und Nutzen bei der Erstellung und bei der Interpretation der visualisierten Information durch den Betrachter) erfolgen (vgl. hierzu im Detail Bernhard und Wenzel 2004; Schumann und Müller 2000; VDI 3633 Blatt 11 2009).

Kriterium	Ausprägung							
Darstellungsdimension	1-D		2-D		2½-D		3-D	
Repräsentation	symbolisch / Zeichen		symbolisch / abstraktes Symbol		ikonisch / stilisierte Abbildung		ikonisch / realitätsnahe Abbildung	
Darstellungsform	Schrift	Tabelle	Diagramm	Zeichnung	Bild	virtuelle Welt	erweiterte Realität	
Skalierung	keine	linear		logarithmisch	exponentiell		kategorisierend	
Planare geometrische Projektion	keine	orthogonal		schief	perspektivisch			
Zeitrepräsentation im grafischen Modell	keine	diskret			kontinuierlich			
Präsentations-zeitverhalten	Standbild	nicht proportionales Bewegtbild	proportionales Bewegtbild / Zeitlupe	proportionales Bewegtbild / Echtzeit	proportionales Bewegtbild / Zeitraffer			
Interaktion	keine	Navigation in der Präsentation	mit dem grafischen Modell	mit dem Datenmodell	in und mit dem Modell (Immersion)			

Abb. 4.26 Morphologischer Kasten zur Klassifikation von Visualisierungsmethoden (vgl. Bernhard und Wenzel 2004, S. 87; in Anlehnung an VDI 3633 Blatt 11 2009)

Die allgemeinen Anforderungen an den Einsatz einer Visualisierungsmethode werden über Auswahlfaktoren wie die Art und Struktur der Daten, Bearbeitungsziele (Zielsetzung der Visualisierung), Wissen und visuelle Wahrnehmungsfähigkeiten des Betrachters sowie die Eigenschaften der verwendeten Ressourcen (wie Hard- und Software, aber auch Personal) bestimmt. Die VDI 3633 Blatt 11 (2009) führt an dieser Stelle wie folgt aus: „Die genannten Faktoren sind für eine qualitativ hochwertige Visualisierung zu gewichten. Dabei sind die Auswahlfaktoren, genauso wie Expressivität, Effektivität und Angemessenheit, nicht unabhängig voneinander. So kann eine bezüglich der Expressivität mangelhafte oder unangemessene Visualisierung kaum effektiv sein. Bekannt ist zusätzlich, dass ästhetische Aspekte die Motivation des Betrachters und damit indirekt die Effektivität einer Visualisierung erheblich beeinflussen. Hinzu kommen ggf. Vorschriften eines Corporate Designs oder kulturelle Unterschiede in der Zielgruppe, die zu beachten sind. Diese komplexen Fakten und Zusammenhänge sind bis heute nur ansatzweise formalisierbar und allgemein nicht über konkrete, einfache Regeln abbildbar.“ (vgl. VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 18).

Die Diskussion der geeigneten Visualisierung für eine gegebene Aufgabenstellung kann und soll an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Die Autoren möchten jedoch auf die grundsätzliche Problematik der Auswahl einer geeigneten Visualisierungsmethode aufmerksam machen. Dreि-

dimensionale hochauflösende Animationsmodelle sind werbewirksam, geben aber oftmals keine Hinweise auf Kennzahlen einer Fabrikanlage.

In den folgenden Abschnitten werden *statische* und *dynamische Visualisierungsmethoden* kurz erläutert. Die Begriffe „statisch“ und „dynamisch“ werden in diesem Zusammenhang oftmals umgangssprachlich verwendet, wenn sie sich auf eine Veränderung der *Darstellung* (Einzelbild versus Bewegtbild) oder eine Veränderung im *Raum* oder in der *Zeit* beziehen. Im Folgenden wird diese Unterteilung für eine Veränderung in der Darstellung vorgenommen, wobei die Kriterien Raum und Zeit wiederum jeweils in ihren Ausprägungen nicht veränderlich (invariant) und veränderlich (variant) sein können.

In Ergänzung zu dieser Differenzierung besteht die Möglichkeit, die *Interaktionsmöglichkeiten bzw. -formen des Betrachters* als weiteres Klassifikationskriterium einzubeziehen. Losgelöst von der statischen oder dynamischen Visualisierung kann der Betrachter nur über einfache Navigationsmittel mit dem Modell interagieren (z. B. in das Modell hineinzoomen, einen Bewegungsablauf vorrspulen) oder aber wie bei der *VR* (Virtual Reality) in das 3D-Modell eintauchen und inhärenter Bestandteil dieses sein. Eine weitere Interaktionsmöglichkeit besteht darin, dass dem Benutzer in Abhängigkeit von seinen Bewegungsabläufen und Handlungen computergenerierte Bilder in seine reale Welt eingebettet werden (*AR Augmented Reality*).

In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass je nach verwendeter Visualisierungsmethode unterschiedliche Visualisierungsmethoden und Projektionstechniken zum Einsatz kommen. Während ein 2D-Gantt-Chart zur Darstellung des Auftragsbearbeitungsstatus auf Papier oder als PowerPoint-Darstellung umgesetzt werden kann, erfordern dreidimensionale Modelle ganzer Fabrikanlagen Großprojektionstechniken, damit sie in ihrer Komplexität überhaupt dargestellt werden können. Auf die Bandbreite der dazu notwendigen technischen Einrichtungen wird in Abschnitt 4.11 näher eingegangen.

4.8.1 Visualisierung statischer grafischer Modelle

Die klassischen statischen Visualisierungsmethoden (zwei- oder dreidimensional) zeichnen sich dadurch aus, dass sowohl im Raum als auch über die Zeit keine Veränderung erfolgt. Hierzu zählen nach Stachowiak (1973, S. 159 ff.) einfache Bildmodelle wie Bilder, teil- oder vollschematische Zeichnungen und Darstellungsmodelle wie Diagramme (z. B. Histogramme, Balken- und Kreisdiagramme), Darstellungsgraphen (z. B. Graphen und Netze) und Fluidogramme (z. B. Schaltbilder, Flussdiagramme,

Sankeydiagramme als Flussdiagramme mit mengenmaßstäblicher Darstellung der Flüsse (vgl. VDI 3633 Blatt 3 1997) sowie Prozessmodelle). Statische grafische Modelle können aufgrund der ihnen zur Verfügung stehenden syntaktischen und semantischen Ausdrucksmittel nur statische Sachverhalte, einfache zeitliche Abhängigkeiten (z. B. Programmablaufpläne) oder auch logische und zeitvariante Wirkzusammenhänge (z. B. SADT-Diagramme oder ereignisgesteuerte Prozessketten, vgl. hierzu auch Abschnitt 4.4) beschreiben (vgl. Wenzel 1998). In Ergänzung zu den klassischen statischen Visualisierungen (siehe auch Abb. 4.27), in denen die Parameter Raum und Zeit keiner Veränderung unterzogen werden, erlauben Zeitdiagramme die Darstellung der zeitlichen Veränderung eines Zustandes. Zu diesen Visualisierungsmethoden zählen zum Beispiel Linendiagramme oder auch Gantt-Charts.

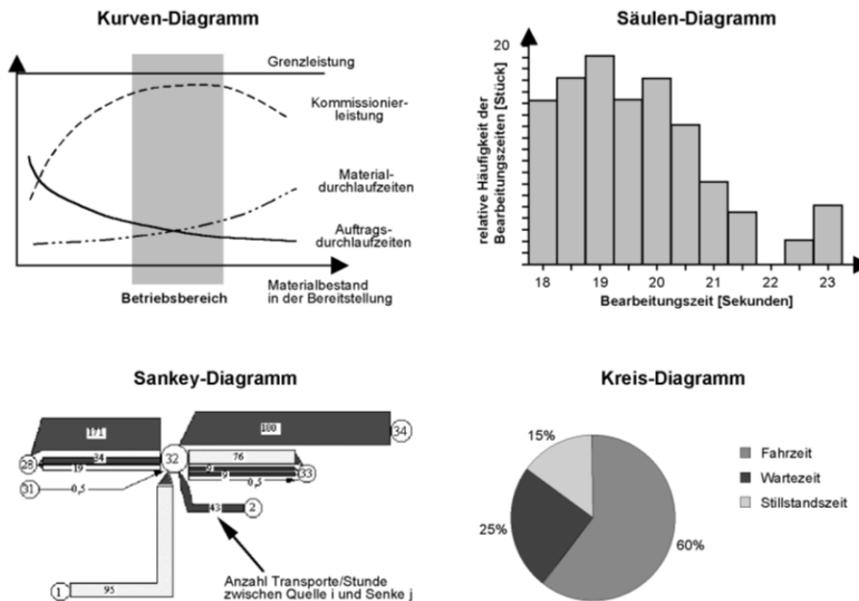


Abb. 4.27 Beispiele für statische 2D-Diagramme (Kuhn und Wenzel 2008, S. 89)

Aufgrund der Entwicklungen in der Computer Grafik sind heutige statische Modelle nicht mehr nur zweidimensional ausgelegt, sondern verdeutlichen räumliche Gegebenheiten in zum Teil photorealistischen Darstellungen. Exemplarische Visualisierungen zeigen die Abbildungen 4.28 bis 4.30.

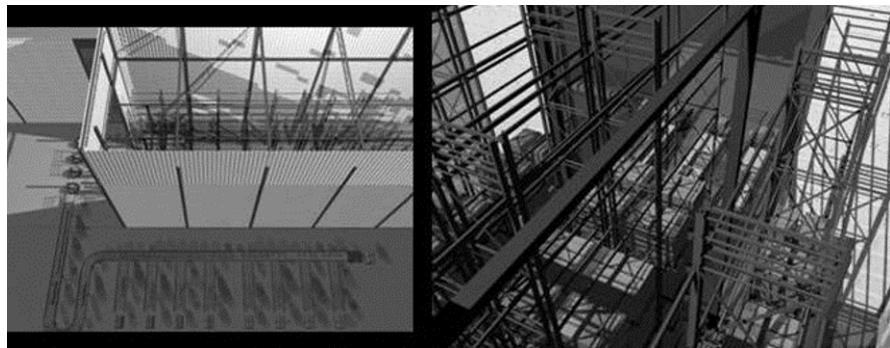


Abb. 4.28 Statische 3D-Modelle: Erleben räumlicher Dimensionen (Quelle: Universität Kassel, Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung)

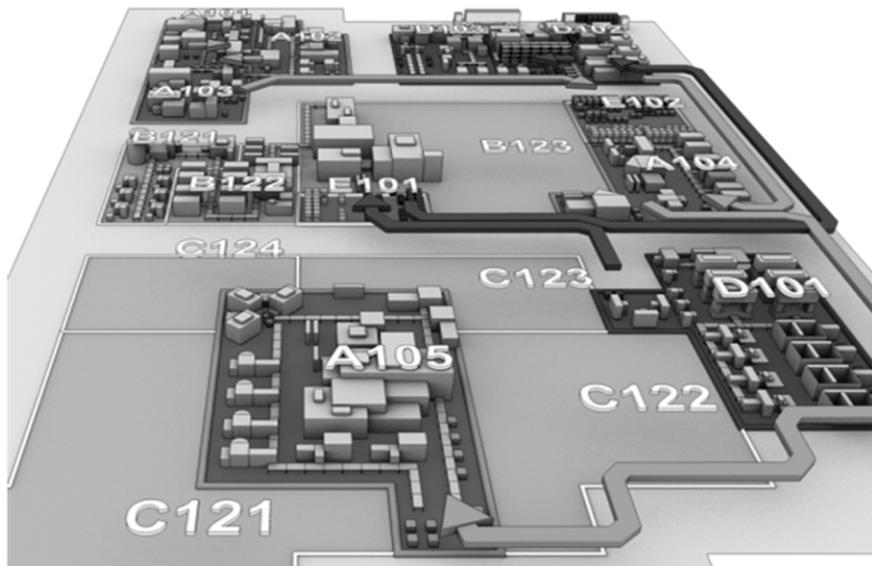


Abb. 4.29 Statisches 3D-Modell: Visualisierung von Transportströmen in einem statischen 3D-Blocklayout (Bockel 2008)

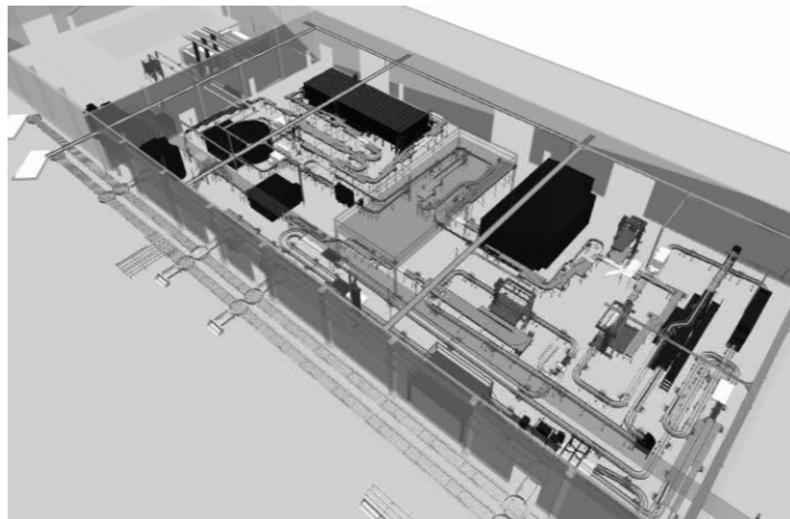


Abb. 4.30 Statisches 3D-Anlagenlayout einer Getränkeabfüllanlage (Quelle: KHS GmbH, Dortmund)

4.8.2 Dynamische Visualisierung

Die dynamische Visualisierung geht von einer veränderlichen Darstellung aus, die zum Beispiel durch die Modifikation der Parameterwerte für den Raum und die Zeit begründet sein kann. Somit lässt sie u. a. als Animation eine zwei- oder dreidimensionale Abbildung von Bewegungsabläufen über die Zeit als weitere Dimension zu. Die darzustellenden Informationen werden entweder über symbolische, ikonische oder fotorealistische Repräsentationen verdeutlicht. Je nach Notwendigkeit, den Raum selbst zu visualisieren, reicht die Bandbreite von einer Visualisierung zeitlicher oder logischer Zusammenhänge ohne Modelllayout (*Monitoring*) über ein einfaches zweidimensionales Modelllayout (*2D-Animation*) bis hin zu einer dreidimensionalen Modellausprägung (*3D-Animation*). Die Ergänzung der geometrischen Objektmodellierung im dreidimensionalen Raum um die Definition eines Zeitverhaltens wird auch als 4D-Modellierung bezeichnet.

Monitoring

Die Methode des Monitoring wird sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von Fabrikanlagen eingesetzt und zur Visualisierung von charakteristischen Kennzahlen oder Zuständen eines technischen oder software-technischen Systems genutzt.

Der Begriff Monitoring stammt aus dem Bereich der Rechner- und Betriebssystembewertung und bezeichnet den „Vorgang des Sammelns von Informationen über eine Programmausführung unter Zuhilfenahme messtechnischer Methoden“ (vgl. Mohr 1992, S. 8). Ziele sind die Überwachung eines Rechner- oder Anlagenbetriebs mit den jeweiligen Prozessen und die Gewinnung von Einsicht in ihre dynamischen, internen Abläufe.

Je nach Anwendungsbereich und geplanter visueller Aussage werden unterschiedliche grafische Darstellungsformen zur Verdeutlichung des Prozessverhaltens gewählt.

Hierzu zählen zeitabhängige Diagramme wie Zeitreihen, visualisierte Analoganzeigen (z. B Füllstandsanzeigen oder Thermometer) oder einfache Symbole und Texte. Eine in diesem Zusammenhang typische Visualisierungsform ist das Gantt-Chart beispielsweise zur Prüfung von Roboterbewegungen (vgl. Abb. 4.19) oder zur Darstellung der Ressourcennutzung bei der Auftragsbearbeitung (siehe Abb. 4.31).

Einen neuartigen Monitoringansatz für die operative CKD-Logistik (CKD – Completely Knocked Down) in Verbindung mit 3D-Visualisierung und Simulation zeigen Bracht et al. (2011) auf.

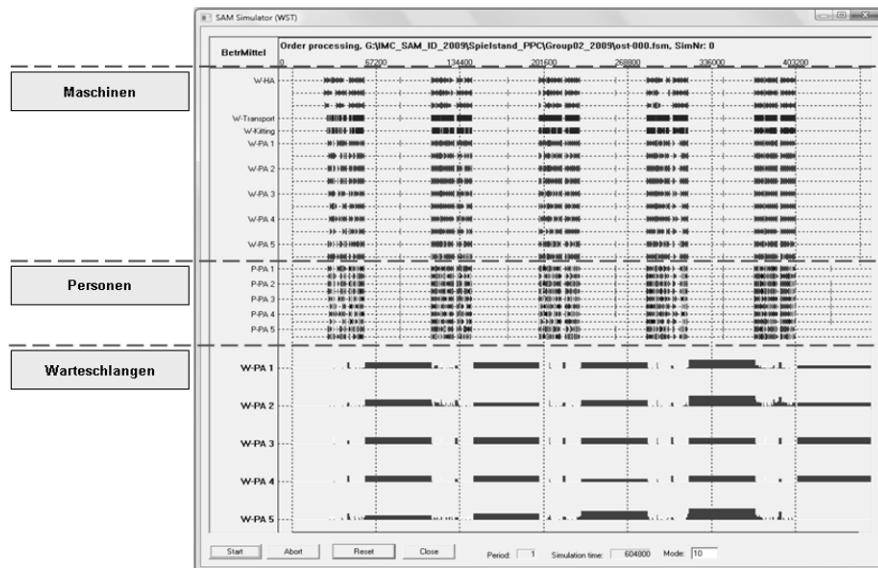


Abb. 4.31 Beispiel eines Gantt-Charts zur Darstellung des Personaleinsatzes in der Auftragsbearbeitung (Quelle: Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation, Karlsruher Institut für Technologie; Simulationsverfahren FEMOS)

2D- und 3D-Animation

Animationen werden im Rahmen der DF eingesetzt, um dynamische Veränderungen innerhalb eines zunächst statischen Modells der Anlage zu veranschaulichen.

„Die Animation bezeichnet die *Erzeugung und Präsentation* von Bildfolgen, in denen Änderungen [...] einen visuellen Effekt bedingen. Unter visuellen Effekten kann eine über die Zeit variierende Position, die Änderung von Form, Farbe, Transparenz, Struktur und Musterung eines Objektes, die Änderung der Beleuchtung sowie der Position, Orientierung und Brennweite der Kamera verstanden werden.“ (vgl. VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3)

Nach dieser Definition setzt sich die Computeranimation „mit der Technik zur synthetischen Erzeugung von bewegten und belebten Bildern mit Hilfe des Rechners und geeigneter Programme auseinander.“ (VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3)

Die Animation selber kann zweidimensional in der Ebene oder dreidimensional im Raum erfolgen und wird u. a. auch zur Darstellung simulierter Abläufe (vgl. Abschnitt 4.6) eingesetzt (siehe hierzu auch Abb. 4.32).

Der Nutzen des Animationseinsatzes in der Simulation bezieht zum einen auf der *Erkenntnisgewinnung* (Verbesserung des Systemverständnisses, Aufdecken von Modellfehlern sowie Unterstützung bei der Analyse von Systemzusammenhängen), zum anderen aus der *Kenntnisvermittlung* (Verbesserung der Kommunikation im Projektteam, der Schulung von Personal und der Akzeptanzerhöhung durch anschauliche Erklärung). In Abhängigkeit von der Realisierung einer Animationskomponente für ein Simulationswerkzeug können Simulations- und Animationsmodell identisch oder unterschiedlich sein. Die Animation selbst kann als simulation-concurrent animation (auch: parallel oder online animation), die zeitgleich zur Simulation stattfindet, und einer post-simulation animation (auch playback animation) umgesetzt werden. Letztere ist dem eigentlichen Simulationslauf zeitlich nachgeschaltet. Weitere Ausführungen auch zu den begrifflichen Zusammenhängen sind der einschlägigen Literatur wie beispielsweise Law (2015) sowie der VDI 3633 Blatt 11 (2009) zu entnehmen.

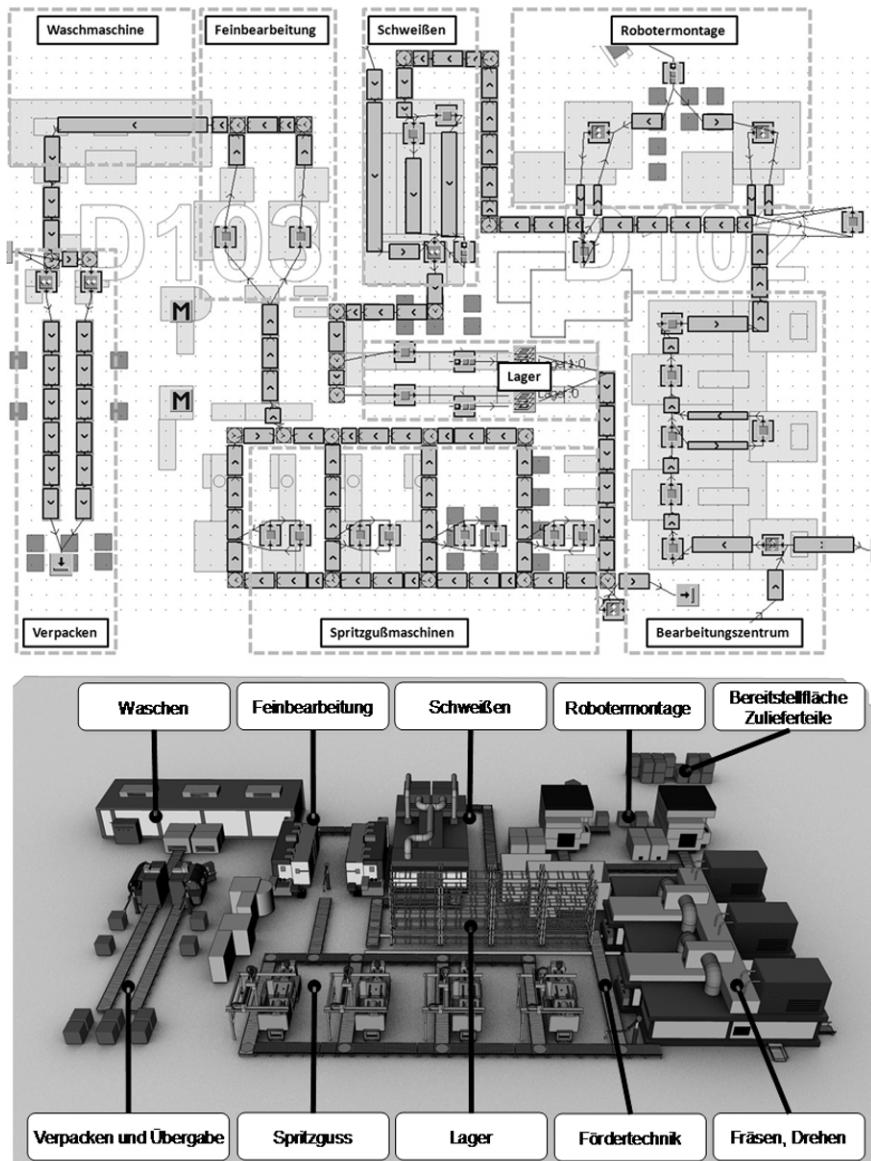


Abb. 4.32 Beispiele für den Einsatz von 2D- und 3D-Modellen zur Verdeutlichung der Abläufe einer ereignisdiskreten Simulation (Quelle: Universität Kassel, Fachgebiet für Produktionsorganisation und Fabrikplanung)

4.8.3 Virtual Reality (VR)

Im Gegensatz zu den bisher dargestellten statischen und dynamischen Visualisierungsmethoden, bei denen keine Interaktionsmöglichkeit des Menschen mit dem Modell besteht, ist die VR durch die Immersion, d. h. das Eintauchen in die virtuelle Welt und die Interaktion zwischen Betrachter und Modell, bestimmt. Die Umsetzung der Immersion erfordert spezielle Eingabe- und Ausgabegeräte (vgl. Abschnitt 4.11).

„Die Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, in eine computergenerierte, dreidimensionale virtuelle Welt einzutauchen, diese als Realität wahrzunehmen, Bestandteil dieser zu sein und mit ihr zu interagieren. Als Teil der computergenerierten Welt kann man diese von verschiedenen Positionen aus betrachten und sie unmittelbar verändern.“ (vgl. VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3)

VR-Modelle können während der Navigation des Menschen im Modell entweder nur statische räumliche Zusammenhänge (statische Raum- und Zeitabbildung) oder Bewegungsabläufe über die Zeit in einem virtuellen Raum darstellen (dynamische Raum- und Zeitabbildung). Im ersten Fall entsteht die Dynamik in der Visualisierung nur über Bewegungen des Menschen und die dadurch bedingten unterschiedlichen Kameraeinstellungen. Im zweiten Fall besitzt das Modell selber weitere dynamische Komponenten.

Beispiele für die Anwendung von VR-Modellen sind die Medizintechnik zur Diagnose und Operationsunterstützung, begehbarer 3D-Architekturmodelle zur anschaulichen Präsentation von Entwürfen, die virtuelle Präsentation von Produkten im Vertrieb oder die Nutzung in Schulungs- und Trainingseinrichtungen.

Im Rahmen der DF erlaubt die VR auch die virtuelle Begehung einer geplanten Anlage (Walk Through), um beispielsweise zu überprüfen, wie das geplante Gebäude von räumlich ausgestaltet ist, welche Lichtverhältnisse herrschen und wie sich die zukünftigen Arbeitsbedingungen darstellen (siehe Abb. 4.33).



Abb. 4.33 VR-Modell für eine spanende Fertigung (Quelle: TU Clausthal, IMAB)

Die Rechenleistung heutiger Anwendungen reicht noch nicht aus, um virtuelle Begehungen einer gesamten Fertigungshalle mit Originalfarben, Schattierungen und Spiegelungen aus den vollständigen Konstruktionsdaten hochauflösend darzustellen. Daher ist für diesen Zweck eine spezielle Aufbereitung der CAD-Daten erforderlich. Auch stellen heutige VR-Systeme in keinem Fall Dauerarbeitsplätze dar. Vielmehr sind weitere arbeitsmedizinische und arbeitswissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkung auf die physische und psychische Belastung des Menschen erforderlich, um belastbare Aussagen hinsichtlich der Einsetzbarkeit im längeren Betrieb machen zu können. Zu weiteren Ausführungen im Bereich VR und zu aktuellen Fallbeispielen sei auf den Abschnitt 7.10.4 sowie Dörner et al. (2013) verwiesen.

4.8.4 Augmented Reality (AR)

Im Gegensatz zur VR erlaubt die Augmented Reality (AR) (engl. Erweiterte Realität) die echtzeitfähige Darstellung virtueller Informationen in Überlagerung mit der realen Umgebung des Betrachters. Ein AR-System ist mobil und erlaubt ein zielgerichtetes Arbeiten des Betrachters in Bezug auf einen definierten Arbeitsbereich und die dort darzustellenden Informationen, da diese im Kontext der Situation und der zu überlagernden realen

Umgebung visualisiert werden. Somit muss der Bezug zwischen computergenerierten Objekten und realer 3D-Szene eindeutig sein. Gleichzeitig ist das intuitive Verstehen der dargestellten Information sicherzustellen. Die Echtzeitfähigkeit erfordert einen permanenten Abgleich von virtuellen und realen Informationen.



Abb. 4.34 AR-System mit tragbarer Computereinheit, Datenbrille und Kamera (Quelle: Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung, Darmstadt)

In Abb. 4.34 ist ein Beispiel eines AR-Systems dargestellt. Dieses umfasst die folgenden Hardwarekomponenten (vgl. auch Encarnaçao und Stricker 2008):

- eine tragbare Computereinheit, die etwa am Gürtel des Anwenders befestigt wird,
- eine Videokamera, mit der die reale Umgebung des Anwenders erfasst wird und
- eine Datenbrille (Head-Mounted Display – HMD), in der die digitalen Informationen in Überlagerung mit der Realität dargestellt werden (vgl. auch Abschnitt 4.11.4).

Moderne Interaktionsparadigmen, die nicht auf Maus- und Tastatureingabe angewiesen sind, unterstützen die erforderliche Mobilität und Agilität des Anwenders, wenn er zur Durchführung seiner Tätigkeiten mit beiden Händen unbehindert agieren muss.

„Bei der Augmented Reality (AR) wird die reale Umwelt mit virtuellen Zusatzinformationen überlagert und gleichzeitig wahrgenommen.“ (vgl. VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3). Mobilität des AR-Systems, Echtzeitfähigkeit und Kontextbezug der darzustellenden Informationen sowie einfache Bedienbarkeit über intuitive Nachvollziehbarkeit der dargestellten Informationen und einfache Systeminteraktion zeichnen die Systeme aus.

Neben dem Begriff AR wird oftmals auch der Begriff Mixed Reality (MR – Mixed Reality) synonym verwendet. Nach Broll (2013) bedeutet dieser Begriff eine Vermischung von virtuellen und realen Inhalten und stellt im Gegensatz zur AR allerdings ein Kontinuum zwischen Realität und Virtualität dar. Entsprechend der von Milgram et al. (1994) eingeführten MR-Taxonomie nimmt in diesem Kontinuum die Realität kontinuierlich ab; gleichzeitig erhöht sich der Anteil an Virtualität. Bei einem höheren Anteil an Realität als an Virtualität wird von AR gesprochen. Ein höherer Anteil an Virtualität als an Realität wird als Augmentierte Virtualität (Augmented Virtuality) bezeichnet. Die VR (vgl. Abschnitt 4.8.3) kennzeichnet – wie bereits angesprochen – eine rein virtuelle Umgebung.

Da es sich bei den meisten AR-Anwendungen um mobile oder zumindest ortsunabhängige Lösungen handelt, entwickelten sich spezifische Lösungen für das Tracking (Nachführen) der exakten Position und Orientierung des Anwenders und daraus abgeleitet des von ihm betrachtenden realen Gegenstandes, damit die richtigen Kontextinformationen angezeigt werden können. Zu Beginn der Entwicklungen wurden häufig Markierungen in der realen Umgebung angebracht, über die dann eine Identifizierung abgeleitet werden konnte. In großen Fabrikanlagen oder auch großräumigen Einrichtungen im Flugzeug- oder Schiffbau ist diese Form der Objektidentifizierung aber nicht leistbar. Fellner et al. (2009) diskutieren beispielsweise eine Lösung für ein markierungsloses Tracking, die auf einer Kombination der Auswertung von Realzeitdaten aus einer Kamera und Bewegungsdaten des Menschen über Sensoren beruht. Aus den Bilddaten können dann charakteristische Punkte in der realen Umgebung identifiziert werden (siehe Abb. 4.35). Broll (2013) erläutert hierzu ausführlich unterschiedliche Trackingverfahren.

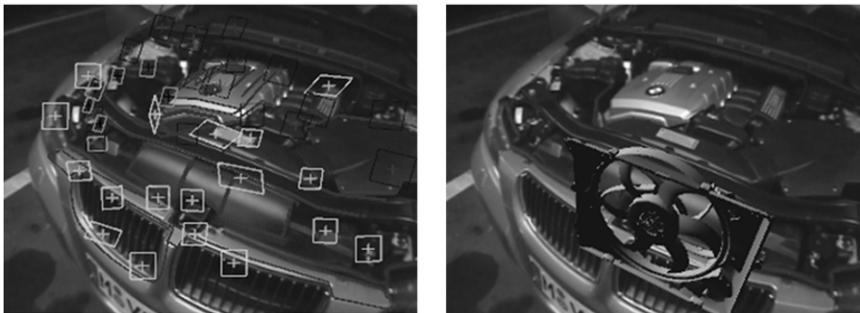


Abb. 4.35 Markierungsloses Tracking unter Nutzung von markanten Merkmalen in der Umgebung: (links) Markante Merkmale wie Ecken und Kanten – (rechts) Visualisierung in der AR-Umgebung (Quelle: Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung, Darmstadt)

Typische Anwendungsbeispiele für AR finden sich für Aufgaben des Servicebetriebs sowie die Wartung und Instandhaltung von Anlagen. Durch das Einblenden von Zusatzinformationen zur Demontage und Montage bei der Reparatur lässt sich vor allem für Einzel- und Sondermaschinen eine höhere Arbeitsqualität und Effizienzsteigerung erreichen. In Analogie hierzu lassen sich auch z. B. die Diagnose- und Instandsetzungsprozesse am Fahrzeug in der Automobilwerkstatt verbessern. Abbildung 4.36 zeigt einen Wartungstechniker, dem über ein HMD Informationen zur Abwicklung seiner Arbeitsschritte in sein Sichtfeld eingeblendet werden. Abbildung 4.37 verdeutlicht den Einsatz von AR zur Schulung von Personal in der Robotertechnik. Fallbeispiele im Rahmen der DF sind im Abschnitt 7.10 zu finden. Weitere Ausführungen und Beispiele zum Stand der Technik führen Dörner et al. (2013) an.

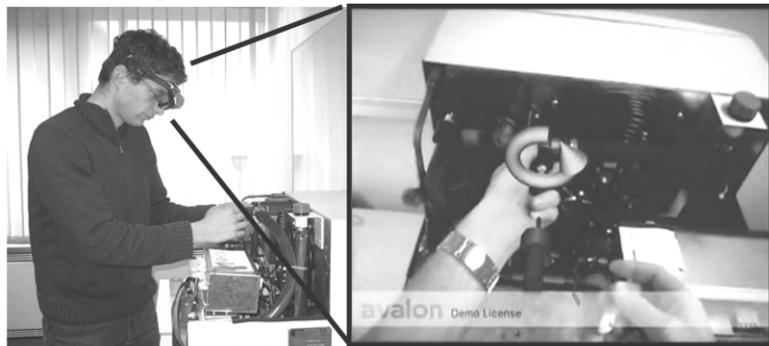


Abb. 4.36 Unterstützung eines Wartungstechniker mit AR-Technologie (Quelle: Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung, Darmstadt)

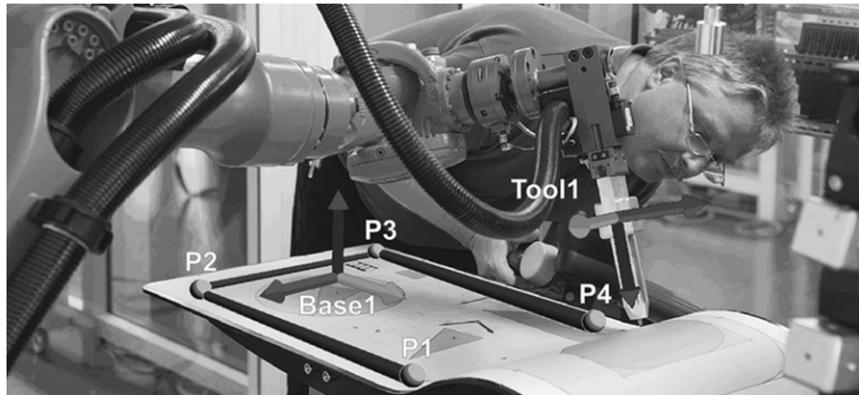


Abb. 4.37 Einsatz von AR bei der Schulung (Quelle: Volkswagen AG)

Auch die Kopplung von AR mit Simulationswerkzeugen ist heute von Interesse. So stellen Scherer et al. (2008) beispielsweise eine AR-Anwendung vor, in der für den Entwicklungsingenieur reale Maschinenbauteile mit Simulationsergebnissen aus einer FEM-Analyse überblendet und auf diese Weise gezielter bewertet werden können.

4.9 Methoden der Kollaboration

Die DF erfordert nicht nur die digitale Abbildung des Planungs- bzw. Untersuchungsgegenstandes (Systemwissen). Um die computerbasierte Zu-

sammenarbeit bzw. Kollaboration (*E-Collaboration*) oder sogar ein Collaborative (Virtual) Engineering (zum Begriff Kollaboration vgl. auch Alt 2003; Kersten et al. 2003; Bernhard 2009) umzusetzen, ist eine IT-basierte Vernetzung aller Aufgaben, Informationen, Daten und Softwarewerkzeuge von der Produktentstehung, über die Produktionsplanung bis hin zum Fabrikbetrieb anzustreben.

E-Collaboration umfasst im weitesten Sinne alle Formen der computerbasierten synchronen oder asynchronen Kollaboration einschließlich einer systematischen gemeinsamen Bearbeitung, Nutzung und Verteilung elektronischer Dokumente von mindestens zwei beteiligten Akteuren in möglicherweise zeitlicher und/oder räumlicher Trennung.

Collaborative (Virtual) Engineering bezieht Kollaboration auf die Aufgaben und Prozesse des Engineering in Produktentstehung sowie Produktionsplanung und -betrieb und unterstützt durch virtuelle Arbeitsumgebungen und Engineering-Plattformen dezentrale Teams auch unternehmensübergreifend.

Zur Umsetzung von E-Collaboration und Collaborative (Virtual) Engineering sind durchgängige kollaborative Arbeitsprozesse zu installieren, so dass über geeignete Methoden die richtigen Informationen den an den Arbeitsprozessen beteiligten Akteuren zur Verfügung stehen. Die medienbruchfreie IT-Unterstützung der Arbeitsprozesse muss somit auch umfassendes Planungs- und Prozesswissen bereitstellen.

Je nach Zielsetzung und Intensität der *Kollaboration* wird die (Geschäfts-)Prozessabwicklung zwischen den beteiligten Akteuren durch unterschiedliche Methoden und Werkzeuge unterstützt. Während sich die *Kommunikation* als die schwächste Ausprägung der Zusammenarbeit im Wesentlichen mit dem Informationsaustausch zwischen den beteiligten Akteuren beschäftigt, zielt die *Koordination* auf die gemeinsam Nutzung von Ressourcen. Moderne Lösungen zur Kooperation werden in der IT beispielsweise durch das Cloud Computing geschaffen, indem IT-Ressourcen wie Server oder Software-Anwendungen über einen Cloud-Anbieter angefragt, reserviert, genutzt und wieder freigegeben werden (vgl. Leymann und Fehling 2017). *Kooperation* als die stärkste Ausprägung der Zusammenarbeit impliziert, dass die beteiligten Akteure ein gemeinsames Ziel verfolgen, das umgesetzt werden soll. Bracht und Hinrichs-Stark (2015) zeigen hierzu ein mit Social Media entwickeltes mobiles Logistikmanagement auf. Kollaboration spannt sich somit je nach Umfang der Abstimmungsprozesse, der Gemeinsamkeit in der Zielsetzung und der zeitlichen und räumlichen Nähe in dem Dreieck zwischen Kom-

munikation, Koordination und Kooperation auf (zum Kollaborationsdreieck vgl. auch Teufel et al. 1995). Nach Teufel et al. (1995) können in Abhängigkeit von dem Grad der Zusammenarbeit verschiedene Unterstützungsfunktionen zum Einsatz kommen, die in einfache Kommunikationssysteme, gemeinsame Informationsräume, Workflow-management sowie Workgroup Computing unterschieden werden. Diese werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert. Ergänzend wird in diesem Abschnitt auch das Projektmanagement als spezifische Methodenklasse zur Organisation einer zielorientierten Zusammenarbeit behandelt.

4.9.1 Technische Kommunikationsmittel

Kommunikationsmittel dienen in erster Linie der Übermittlung von Daten und Informationen; hierbei werden asynchrone und synchrone Kommunikationsformen unterschieden. Kommunikationsmittel dienen der Unterstützung der Kommunikation zwischen Partnern (ein oder mehrere Sender sowie ein oder mehrere Empfänger). Technische Kommunikationsmittel wie Briefe, Zeitschriften, Fernsehen oder das Telefon werden durch IT-gestützte Kommunikationsmittel wie E-Mail, Chat, Internet oder Voice- und Videokonferenzen ergänzt oder sogar ersetzt. Während E-Mail einen asynchronen Informationsaustausch zwischen zwei oder mehreren Akteuren zu unterschiedlichen Zeiten unterstützt, werden beispielsweise Videokonferenzen zum zeitgleichen Informationsaustausch von Partnern, die an verteilten Orten arbeiten, eingesetzt. IT-basierte Kommunikationsmittel unterstützen eine medienbruchfreie Abwicklung von Geschäftsprozessen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es neben den technischen Kommunikationsmitteln auch natürliche Kommunikationsmittel wie Sprache, Zeichensprache oder nonverbale Kommunikationsmittel wie Körpertaltung gibt.

4.9.2 Gemeinsame Informationsräume und Wissensmanagement

Basis der Prozesse einer Zusammenarbeit ist der gezielte Austausch und die Verarbeitung von Daten, Informationen und Wissen (zur Abgrenzung der drei Begriffe vgl. Abschnitt 5.1.1). Gemeinsame Informationsräume definieren und verwalten für ein Projektteam Informationsobjekte und erlauben deren gemeinsame Handhabung.

Als Oberbegriff für Medien zum Austausch von Inhalten wie beispielsweise Ideen, Bilder, Daten und Software zwischen Internetnutzern hat sich der Begriff Social Media (deutsch: Soziale Medien) durchgesetzt. Hierzu

zählen beispielsweise Foren, Blogs, Wikis, soziale Netzwerke oder auch Auskunftsportale. Basis der Entwicklungen zur Umsetzung derart interaktiver Communities stellen moderne Webservices dar, die auch unter dem Begriff Web 2.0 (vgl. auch Lackes und Siepermann 2017) subsumiert werden. Die Teilnehmer können Beziehungen zueinander aufbauen und ihre eigenen Inhalte erstellen (engl.: Customer Created Content).

Zur Umsetzung von gemeinsamen Informationsräumen werden in Unternehmen aber auch Datenbanksysteme sowie Methoden und Werkzeuge des Wissensmanagements eingesetzt. Als Beispiel für die in der Produktentstehung eingesetzten technischen *Datenbank- und Kommunikationssysteme* seien PDM-Systeme genannt (vgl. VDI 2219 2016). Sie unterstützen alle Aktivitäten zur Erstellung, Änderung bzw. Versionierung und Archivierung einer Produktstruktur, speichern und verwalten die hierzu notwendigen Informationen über Produkte sowie deren Entstehungsprozesse und stellen diese transparent allen Unternehmensbereichen zur Verfügung. PDM-Systeme stellen eine Integrationsplattform für alle im Produktentwicklungsprozess einzusetzenden Werkzeuge dar (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 5.3.1).

Wissensmanagement in dem hier verstandenen Sinne orientiert sich an der VDI 5610 Blatt 1 (2009) und umfasst die Organisation der Prozesse, in denen Informationen, Erkenntnisse und Erfahrungen identifiziert, erzeugt, gespeichert, verteilt und angewendet werden. Wissen vereint Informationen und kontextbezogene Erkenntnisse und Zusammenhänge und ist damit eine „zweckorientierte Vernetzung von Information“ und „begründete Kenntnis“ über die Zusammenhänge zwischen Informationen (vgl. Rehäuser und Krcmar 1996, S. 5). Die Wissensbasis, die ein Unternehmen besitzt, ist ein Faktor, dem besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Sie umfasst nicht nur das technologische Wissen, sondern auch das Wissen der MitarbeiterInnen und das Wissen über Prozesse (vgl. Remus 2002). Die Aufgabe des Wissensmanagements ist somit die Gestaltung und Lenkung der gesamten Wissensbasis eines Unternehmens. Die Kernfunktionen des Wissensmanagements befassen sich mit der Planung, Identifikation und Bewertung von Wissen, der Erzeugung neuen Wissens, der Ablage bzw. Speicherung von Wissen sowie der Verteilung und Anwendung des Wissens (VDI 5610 Blatt 1 2009). Der Einsatz des Wissensmanagement im Kontext der Digitalen Fabrik wird beispielsweise in Willmann (2011) behandelt. Hier unterstützt eine kontextbasierende Wissensumgebung ein planungstätigkeitsübergreifendes Verständnis und damit die Kooperation der Experten innerhalb der DF.

Ein *Datenmanagement* unterstützt in der Regel das Wissensmanagement, indem es das Wissen strukturiert verwaltet und gezielt zugreifbar macht (zum Begriff des Datenmanagements vgl. auch Abschnitt 5.1.1).

Auch Expertensysteme sind computergestützte Systeme, die als Unterstützung des Wissensmanagements zum Einsatz kommen. Sie bezeichnen Programme, mit denen das Spezialwissen und die Schlussfolgerungsfähigkeit qualifizierter Fachleute nachgebildet werden. Ziel von Expertensystemen ist es, Wissen, das Experten durch Handlung und Erfahrung gesammelt haben, automatisiert und verarbeitbar zu speichern und somit jederzeit reproduzierbar zur Verfügung zu haben (Puppe 1991). Für weitgehende Ausführungen zur Entwicklung und zum Einsatz von Expertensystemen sei beispielsweise auf Kurbel (1992) verwiesen. Expertensysteme haben sich entgegen den Erwartungen wegen des hohen Erfassungs- und Pflegeaufwandes jedoch nicht durchgesetzt. Ein neuerer Ansatz besteht in sogenannten selbstlernenden Kognitiven Systemen, die als Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz in der Lage sind, Schlussfolgerungen aus großen Datenmengen zu ziehen, beispielsweise über das Kaufverhalten von Kunden oder die erfolgversprechendste Krebstherapie.

4.9.3 Workflowmanagement und Workgroup Computing

Sowohl das Workflowmanagement als auch das Workgroup Computing sind dem Computer Supported Collaborative Work (CSCW – Computer Supported Collaborative Work) zugeordnet, das sich als interdisziplinäres Forschungsgebiet aus den Bereichen Wirtschaftsinformatik, Informatik, Soziologie, Informationsmanagement, Personalmanagement, Organisationslehre, Psychologie und Kommunikationswissenschaft speist (vgl. Hasenkamp et al. 1994).

Das Workflowmanagement dient der Koordination der Aktivitäten in einem Team und befasst sich mit der operativen Umsetzung von Arbeitsabläufen oder Geschäftsprozessen - Workflow genannt - mit dem Ziel, Dokumente, Informationen oder Aufgaben an die jeweiligen Prozessbeteiligten weiterzureichen.

Als Workflow kann die IT-gestützte Umsetzung eines Geschäftsprozesses verstanden werden; hier wird festgelegt, welche Dokumente, Informationen und Aufgaben von welchen Akteuren, wann und in welcher Reihenfolge nach welchen Regeln zu bearbeiten sind. Ein Workflow ist somit ein Instrumentarium zur Steuerung und zur Kontrolle von Geschäftsprozessen.

Zur Definition von Workflows sei auf die Workflow Management Coalition (WfMC, vgl. auch WfMC) verwiesen, die sich als Organisation in einem Verbund von Herstellern, Nutzern, Beratern und Wissenschaftlern mit der Weiterentwicklung von Workflows beschäftigt und ein Workflow-

Referenzmodell sowie ein multilinguales Glossar festgelegt hat. Ziel von Workflowmanagementsystemen als IT-gestützte Realisierung eines Workflowmanagements ist die durchgängige, strukturierte Unterstützung aller regelmäßigen Prozesse im Unternehmen. Hierfür stellen fundierte Kenntnisse über die Geschäftsprozesse sowie über die organisatorischen Strukturen eine notwendige Voraussetzung dar, damit die Workflowmanagementsysteme die bestehenden arbeitsteiligen, oftmals örtlich und zeitlich verteilten Prozesse überhaupt zweckdienlich und aufgabenadäquat unterstützen können. Zur Ermittlung der potenziellen Workflows entwickelten daher beispielsweise Bracht und Scheffler (2008) eine Methode zur Identifizierung von Workflows für die Produktionsplanung.

Systeme für Workgroup Computing als weitere Einsatzform des CSCW stellen Infrastrukturen und Ressourcen für die unmittelbare Zusammenarbeit in kleineren Teams bereit, wobei diese Teams auch räumlich und/oder zeitlich getrennt voneinander agieren können und in der Regel nur eine zeitlich befristete Projektaufgabe bearbeiten. Groupware-Systeme erlauben eine unstrukturierte und flexiblere Bearbeitung von Prozessen als Workflowmanagementsysteme. In Abhängigkeit von der räumlichen und zeitlichen Aufteilung der Teams (an einem Ort zur gleichen Zeit oder auch an unterschiedlichen Orten zu unterschiedlichen Zeiten) werden verschiedene Systeme eingesetzt. Als Werkzeuge dienen spezielle Editoren sowie Entscheidungs- und Sitzungsunterstützungssysteme, die eine simultane, gleichberechtigte Zusammenarbeit und die Kommunikation mit und ohne Medien zulassen. Typische Groupware-Softwarewerkzeuge unterstützen die Gruppenarbeit vor allem durch eine gemeinsame Erstellung, Ablage, Versionierung und Verwaltung von Projektdokumenten über einen Projektserver, auf den über das Intranet oder das Internet zugegriffen werden kann. In sogenannten Social Business Anwendungen wachsen klassische Groupware-Lösungen zunehmend mit Sozialen Medien zusammen. Ein Beispiel hierfür stellt der von Hinrichs-Stark (2016) entwickelte Ansatz zur ortsungebundenen Zusammenarbeit in Lieferketten dar.

Auch die in Abschnitt 4.9.1 benannten technischen Kommunikationsmittel wie E-Mail, Chat oder Videokonferenzsysteme können als einfache Unterstützungsfunctionen für das Workgroup Computing eingesetzt werden. Zu den synchronen Workgroup Computing Unterstützungsmedien, die als Kollaborationsplattform für das partizipative Planen in einem interdisziplinären Team an einem Ort eingesetzt werden, gehören beispielsweise Planungstische und Multiprojektionsräume (vgl. Abschnitt 4.11.2).

Das partizipative Planen und Gestalten von Systemen wird allerdings nicht nur durch moderne IT-Systeme unterstützt. Beispielsweise sind vor allem in der Automobilindustrie auch heute noch Planungsworkshops unter Verwendung von Papier und Pappe im Einsatz; hier werden gemeinsam

Planungen vorbereitet und Systemumgestaltungen an Pappmodellen diskutiert (siehe Abb. 4.38).



Abb. 4.38 Einsatz von VR-Methoden zum Aufbau von 3D-Modellen aus den Ergebnissen eines Planungsworkshops mit Pappmodellen: (links) Pappkartons mit Kennzeichnung – (rechts) Darstellung eines generierten VR-Modells auf Basis der Positionen der Pappkartons (Quelle: Volkswagen AG)

Über eine geeignete Kennzeichnung der jeweiligen Pappkartons werden hier entsprechende VR-Modelle generiert und so eine Vernetzung von klassischen partizipativen Planungsmethoden mit den Methoden der DF erprobt. Damit wird es möglich, klassische intuitive Verfahren zu nutzen und gleichzeitig die Ergebnisse direkt in weiterbearbeitbare 3D-Modelle zu integrieren.

Für weitergehende Informationen zu Systemen und Anwendungen des CSCW sei auf Schmitz und Burmester (2007) verwiesen.

4.9.4 Projektmanagement

Eine spezifische Form der Unterstützung einer zielorientierten Zusammenarbeit in personen- und sachbezogener Hinsicht ist das Projektmanagement. Zum *Projektmanagement* gehören „alle Aktivitäten für Definition, Planung, Kontrolle und Abschluss eines Projekts, es ist damit ganz auf das zielorientierte Abwickeln der einzelnen Projektarbeiten ausgerichtet.“ (vgl. Burghardt 2013, S. 10). Entsprechend diesen Aufgaben werden unterschiedliche Methoden im Rahmen des Projektmanagements eingesetzt. Bei der Aufwandsabschätzung zu Beginn eines Projektes kommen beispielsweise Schätzmethoden wie die Expertenschätzung oder die Delphi-Methode zum Einsatz. Das Projektcontrolling wird methodisch durch Soll-/Ist-Vergleiche, Meilensteintrendanalyse (MTA - Meilensteintrendanalyse) oder die Earned Value Analysis (EVA – Earned Value Analysis) ergänzt,

die eine integrierte Betrachtung von Kosten, Zeit und Leistung durchführt und auf dieser Basis eine Prognose sowohl für die erwarteten Gesamtkosten als auch den Fertigstellungszeitpunkt des Projektes ableitet.

Weitere umfassende Ausführungen zu Methoden des Projektmanagements sind der DIN 69901-3 (2009) sowie Gessler (2014) zu entnehmen. Unter Verwendung der Methoden Arbeitspaketplanung, Terminplanung und Reifegradmonitoring wird in Bracht et al. (2004) ein ganzheitliches prozessorientiertes Projektmanagement für die Automobilproduktion vorgestellt. Das Projektmanagement der Fabrikplanung aus Sicht der Produktions- und Gebäudeplanung wird in Wiendahl et al. (2014b, Kapitel 16) vertiefend behandelt.

Herausforderungen und Lösungen zum Projektmanagement speziell bei Fahrzeugprojekten zeigt Geckler (2002) umfassend auf. Brunner (2005) geht insbesondere auf internationales Projektmanagement im Beispiel von Lkw-Produktprojekten näher ein. Im Zusammenhang mit der organisatorischen Einführung der DF sind Anwendungen der Methoden des Projektmanagements in Kapitel 6 zu finden.

4.10 Aspekte der Modellbildung und Modellnutzung

Die vorherigen Abschnitte verdeutlichten die Vielzahl der unterschiedlichen Methoden, die im Kontext der DF zum Einsatz kommen. Abbildung 4.39 stellt beispielhaft die Bandbreite der Betrachtungsgegenstände in Produktion und Entwicklung in Kombination mit den zu verwendenden Methoden dar. Die Ausprägung der Modelle unterscheidet sich jedoch weit umfassender.

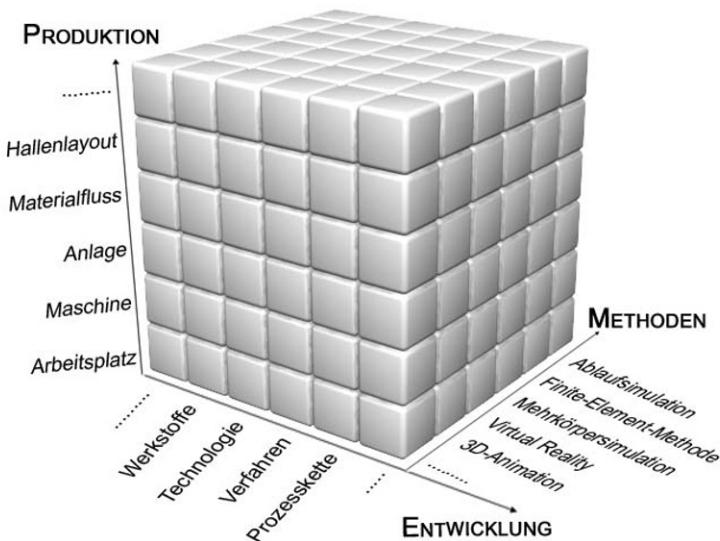


Abb. 4.39 Bandbreite der Betrachtungsgegenstände und Methoden im Rahmen der Digitalen Fabrik (in Anlehnung an Bracht und Reichert 2008, S. 34)

Für jede Kombination der Dimension „Produktion“ und „Entwicklung“ bestimmen in Abhängigkeit von der einzusetzenden Methode wiederum unterschiedliche Untersuchungsziele die Sicht auf den abzubildenden realen Systemausschnitt und die im Fokus der Betrachtung stehenden charakteristischen Systemeigenschaften.

Entsprechend unterscheiden sich die Modelle, die mit diesen Methoden erstellt werden. Merkmale der unterschiedlichen Modellklassen in der DF werden auszugsweise durch die Abbildung 4.40 verdeutlicht. Die Einteilung in „trifft nicht zu – teils – teils – trifft voll zu“ spiegelt die vorherrschende Charakterisierung der jeweiligen Modellklasse wider. Eine detaillierte Beschreibung zur Differenzierung von Modellen in der DF ist u. a. Wenzel (2004) und Wenzel et al. (2005) zu entnehmen.

Modellmerkmale Modellklasse	Raumbezug	Zeitbezug	Modell-verhalten	Physikalische Gesetzmäßigkeiten	Abbildung des Personals	Modellierungs-konzept	Aussage-kraft der Ergebnisse								
	Parameter	2D - Geometrie	3D - Geometrie	statisch	dynamisch	deterministisch	stochastisch	Parameter	Kinematik	personal-integriert	personal-orientiert	aufbauorganisatorisch	ablauforganisatorisch	quantitativ	qualitativ
Architektur	◐	◐	●	●	●	○	◐	●	○	○	◐	◐	●	●	◐
Standort und Infrastruktur	●	●	●	●	●	○	○	●	○	○	●	●	●	○	●
Prozesskette	◐	○	○	●	●	○	○	●	○	○	●	●	○	●	●
Konstruktion	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	○	●	●
Ablaufsimulation	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Virtual Reality	○	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●
Animation	○	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ergonomiesimulation	◐	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Legende
 ○ trifft nicht zu
 ◐ teils - teils
 ● trifft voll zu

Abb. 4.40 Beispiele für Modellklassen in der DF aus Sicht der Anwendung mit Zuordnung von Modellmerkmalen (in Anlehnung an Wenzel 2004, S. 55)

Das Integrationsziel der DF besteht darin, die einzelnen heterogenen Modelle so zu vernetzen, dass in Abhängigkeit von der jeweils durchzuführenden Aufgabe ein teamübergreifendes, durchgängig IT-gestütztes, redundanzfreies Arbeiten über den gesamten Anlagenlebenszyklus in einem homogenen Arbeitsumfeld möglich wird. Der Anwender schafft sich die für seinen Handlungsrahmen notwendigen individuellen fach- und problembezogenen Sichten auf die Modelle und ruft aufgabengerecht die zugehörige Information über eine durchgängige und stets aktuelle Informationsbasis ab.

Die jeweils zu vernetzenden Modelle bestimmen sich – wie bereits dargelegt – zum einen über die abzubildenden Produkte, Prozesse und Ressourcen des Betrachtungsgegenstandes (*Systemwissen*). Zum anderen sind für die durchgängige Modellnutzung auch die organisatorischen Schritte der Planung und Betriebsführung (*Planungs- und Prozesswissen*) IT-basiert zu unterstützen und damit über geeignete Modelle abzubilden.

Modelle der DF sind immer für zu betrachtende Systeme, vorgegebene Untersuchungsziele und Gültigkeitszeiträume hinreichende Abbilder der Realität (vgl. auch Wenzel 2006). Daher ist bei der Modellbildung stets die Gültigkeit (Validität) eines Modells für einen gegebenen Untersuchungszweck und damit seine Glaubwürdigkeit zu prüfen. In diesem Zusammenhang greifen Techniken der Verifikation, mit denen geprüft werden kann,

ob das Modell richtig, also hinreichend fehlerfrei, vollständig, konsistent und plausibel ist, und Techniken der Validierung. Damit wird die Frage zu beantwortet, ob das Modell für die Aufgabenstellung geeignet und damit das richtige Modell ist (zur Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen und zu möglichen Techniken vgl. Rabe et al. 2008).

Losgelöst von den jeweils eingesetzten Modellierungsmethoden sind für die Erstellung, Weiterentwicklung, Pflege und Wartung der Modelle in der DF unterschiedliche Aspekte der Modellbildung und -nutzung sowie der Qualitätssicherung zu beachten; dies gilt im verstärkten Maße für die Anwendung der Modelle als Digitale Zwillinge im Kontext Industrie 4.0:

- Schaffung von Modellierungskonventionen und -standards
- Sicherstellung der Gültigkeit und Glaubwürdigkeit implementierter Modelle (s. o.)
- Schaffung eines durchgängigen Modellmanagements und einer tragfähigen Modelldokumentation
- Entwicklung von Vorgehensmodellen mit definierten Meilensteinen für ein kollaboratives IT- bzw. modellbasiertes Planen und Handeln
- Schaffung der Voraussetzungen für eine durchgängige Modellbildung und -nutzung in einer kollaborativen Engineering-Plattform über die Entwicklung von Schnittstellenstandards (z. B. für CAD-Daten) und Interoperabilitätskonzepten.

Allerdings kann der *Subjektivität* der Modellbildung nur teilweise entgegengewirkt werden. Daher wird die Einigung auf projektspezifische, unternehmensinterne oder sogar branchenspezifische Modellierungskonventionen eine wichtige zukünftige Aufgabe sein. Hier sind beispielsweise die Aktivitäten der VDA-Arbeitsgruppe Ablaufsimulation zu nennen, die sich u. a. die Implementierung eines Automotive-Baustein-Kastens für die ereignisdiskrete Simulation zum Ziel gesetzt hat und auf dessen Basis auch Konzepte der automatischen Modellgenerierung umsetzen will (Heinrich und Mayer 2006). Die Nutzung des Baustein-Kastens (siehe auch Abb. 4.41) ist durch einen Leitfaden geregelt. Dieser legt Vorgaben für die Modellbildung (z. B. Richtlinien hinsichtlich Modellstruktur, Namensgebung und Kommentierung von Quellcode) fest, fordert die Verwendung eines vorgegebenen Vorgehensmodells, gibt Konventionen bei der Dateiverwaltung vor und regelt die Auslegung der Modelle im Hinblick auf zukünftige Integrationsanforderungen und Schnittstellen (vgl. Mayer und Spieckermann 2008).

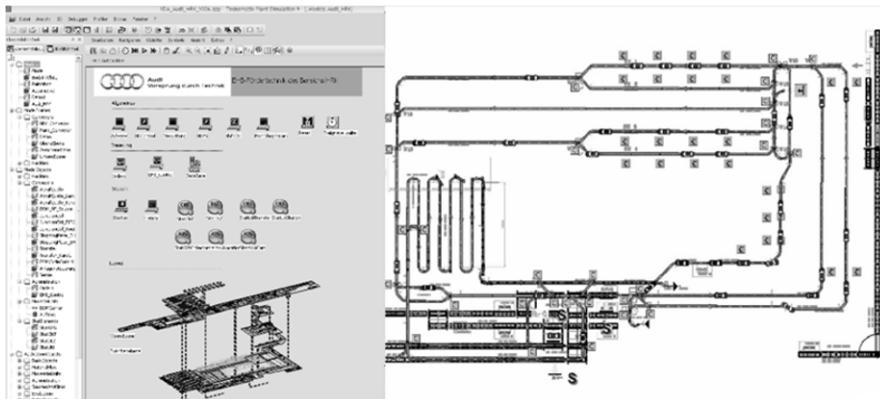


Abb. 4.41 Auszug aus dem Automotive-Bausteinkasten des VDA für die ereignisdiskrete Simulation (Quelle: AUDI AG, Ingolstadt)

Die Sicherstellung der Gültigkeit dieser Bausteinbibliotheken und Standardmodelle zur Wieder- und Weiterverwendung zu einem späteren Zeitpunkt oder in einem anderen Kontext, erfordert erweiterte Methoden zur Überprüfung der Glaubwürdigkeit von Modellen. Auch müssen Handlungsanleitungen die permanente Anpassung der Modelle an neue Gegebenheiten sicherstellen. Ebenso ist die Verifikation und Validierung von vernetzten Modellen (Simulations- und Datenmodellen) zu klären. Ggf. kann die Wieder- und Weiterverwendbarkeit der Modelle über ergänzende Metainformationen bezüglich Untersuchungszielen, Zweck und Gültigkeitszeitraum gezielt unterstützt werden. Inzwischen gehen Konzepte für Modellmanagement und Modelldokumentation diesen Weg.

4.11 Technische Einrichtungen für die Digitale Fabrik

Die technischen Einrichtungen zur Umsetzung leistungsstarker Planungs-, Simulations- und Visualisierungslösungen sind je nach Anwendung und durchzuführenden Aufgaben auszulegen und reichen von einfachen Desktop-Systemen bis hin zu Powerwall- und CAVE-Projektionssystemen für High-End-Anwendungen (zur CAVE vgl. Abschnitt 4.11.3). Je nach Aufgabenstellung sind spezifische Ein- oder Ausgabegeräte notwendig.

Die folgenden Ausführungen geben einen kurzen Überblick über spezifische Klassen von Techniken, die im Kontext der DF zum Einsatz kommen können. Für eine detaillierte Beschreibung von technischen Lösungen sei auf einschlägige Hardwarelieferanten verwiesen. Datener-

fassungsgeräte, wie sie beispielsweise beim Einsatz von RFID oder beim Laserscanning notwendig werden, sind in Abschnitt 4.3.3 beschrieben; auf diese Techniken wird im Rahmen dieses Abschnittes nicht noch einmal eingegangen. Auch die technischen Ausführungen mobiler Endgeräte werden in diesem Abschnitt nicht behandelt; ihre Potenziale für die Fabrikplanung werden in Abschnitt 7.10 diskutiert.

4.11.1 Einzelarbeitsplätze

Aufgrund der Entwicklungen der Computertechnik können auch in Zukunft die immer umfangreicher und damit leistungsintensiver werdenden Aufgaben im Kontext der DF an handelsüblichen Standardarbeitsplätzen ausgeführt werden. Hierzu zählen Aufgaben wie

- die Layoutplanung ganzer Werkshallen,
- die Erstellung von CAD-Konstruktionszeichnungen,
- statische Kollisionsprüfungen am Produkt oder in Verbindung mit Betriebsmitteln,
- Kinematiksimulationen,
- Materialflusssimulationen oder auch die
- Aufbereitung von VR-Präsentationen.

Die Ausstattung eines Einzelarbeitsplatzes umfasst typischerweise einen großformatigen Bildschirm (17-21 Zoll) als Flachbildschirm sowie Tastatur und Maus in Standardausführung. Abweichende Sonderausstattungen sind nur in Sonderfällen aufgrund der Funktionalität der eingesetzten Software notwendig. Je nach Vorliebe des Anwenders bzw. Komplexität der Aufgabe werden ggf. zwei Bildschirme parallel eingesetzt, um die Erstellung großer Modelle, beispielsweise für die Layoutplanung oder die Simulation, zu vereinfachen.

Zeichenbretter in den Konstruktions- und Planungsabteilungen wurden bereits vor vielen Jahren von CAD-Arbeitsplätzen abgelöst und durch Einzelarbeitsplätze mit großformatigen Flachbildschirmen oder alternativ mit zwei Bildschirmen ersetzt. Da alle Konstruktionsdaten als CAD-Modelle vorliegen müssen, dienen evtl. noch vorhandene Zeichenbretter lediglich der Betrachtung großformatiger Plots. Die großen Formate werden genutzt, da sie Zusammenhänge besser verdeutlichen als eine Darstellung am Bildschirm, bei der nicht gleichzeitig Details und Überblick präsentiert werden können.

Einzelarbeitsplätze benutzen in der Regel für die Ausgabe von Daten auf Papier einen hochauflösenden DIN-A3 oder DIN-A4 Farbdrucker als Ausgabegerät. Für großflächige Modelle kann der Einsatz von A0-Plottern

sinnvoll sein. Für längere Texte, intensive Korrekturen und abzuzeichnende Dokumente ist das Papierdokument immer noch das Mittel der Wahl.

4.11.2 Arbeitsplätze zur Kollaboration

Die Kollaboration in interdisziplinären Teams besitzt in Abhängigkeit von der räumlichen Nähe der Akteure und des zeitlichen Bezugs der Zusammenarbeit (synchron, asynchron) sehr unterschiedliche Ausprägungen (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.9). Zu den gängigen Lösungen zählen beispielsweise Videokonferenzsysteme, elektronische Projektionswände oder interaktive elektronische Whiteboards.

Darüber hinaus gibt es spezielle technische Systeme, die auf die Bedarfe der digitalen Planung in interdisziplinären Teams zugeschnitten sind. Hierzu zählt beispielsweise der Planungstisch, der ursprünglich an der ETH Zürich entwickelt wurde (Rauterberg et al. 1997; BUILD-It 2009). Eine Fertigungsanlage wird in einer Aufprojektion als Layout auf dem Tisch abgebildet. Die dazugehörige Ansicht wird über einen Beamer an die Wand projiziert. Die Interaktion in dem Modell erfolgt über kleine „Klötzchen“ (engl. Bricks), die auf dem Tisch verschoben werden können, um so eine entsprechende Positionsänderung der Objekte im Modell auszulösen. Auf diese Weise sind unkompliziert und intuitiv Layoutänderungen in ihren Auswirkungen nachzuvollziehen und zu diskutieren. Heute gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen für Planungstische. Zwei Beispiele sind in Abbildung 4.42 dargestellt, hier erfolgt die Interaktion direkt auf Fingerdruck.



Abb. 4.42 Projektionsmöglichkeiten am Planungstisch visTABLE (Quelle: plavis GmbH, Chemnitz)

In vielen Großunternehmen und Forschungseinrichtungen sind heute sogenannte *Multiprojektionsräume* für die simultane Bearbeitung und die Diskussion unterschiedlicher Planungsergebnisse im Team eingerichtet. Mit der gleichzeitigen Projektion von Produktdaten, Betriebsmitteldaten, dem Protokoll, Analysedaten oder dem Arbeitsplan lassen sich komplexe Probleme effektiv interdisziplinär lösen. Abbildung 4.43 zeigt das technische Equipment und die Gestaltungsmöglichkeiten für einen derartigen Raum mit Projektionsflächen als 3D-Projektionswand.



Abb. 4.43 Ausstattung eines Multiprojektionsraums am Beispiel des für Forschung und Lehre eingerichteten Competence Labors Digitale Fabrik (Quelle: Universität Kassel, Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung)



Abb. 4.44 Multiprojektionsraum im Einsatz (Quelle: TU Clausthal, IMAB)

Einen Multiprojektionsraum im praktischen Einsatz unter Verwendung einer Projektionswand für VR-Modelle und eines zusätzlichen elektronischen Whiteboards verdeutlicht Abbildung 4.44.

4.11.3 Projektionstechniken

Zur Unterstützung der Verwendung von Modellen als Kollaborationsmedien in interdisziplinären Teams stehen unterschiedliche Projektionstechniken zur Verfügung. Die Teamarbeit an den Modellen kann zu einem hohen Prozentsatz über eine 2D-Beamerprojektion in einem Besprechungsraum erfolgen. Diese 2D-Darstellung ersetzt mittlerweile weitgehend einfache Projektionstechniken wie Overhead-Projektoren oder die Arbeit am Flip-Chart. Dessen Funktion kann leicht von einer Office-Anwendung übernommen werden. Als Ergebnis erhält man ein digitales Dokument, das direkt verteilt werden kann.

Für einige Fragestellungen ist zur Diskussion an digitalen Modellen die Nutzung einer 3D-Projektion sinnvoll. In diesen Fällen wird das zu präsentierende grafische Modell von einer Spezialsoftware aufbereitet und über Beamer überlagert angezeigt. Mit einer speziellen Brille entsteht beim Betrachter ein stereoskopischer Eindruck, der ein „Begehen“ der Fabrikanlage erlaubt. Dieser Effekt ist besonders bei virtuellen Rundgängen (Walk Through) interessant, um räumliche Eindrücke von real nicht zu-

gänglichen Bereichen zu vermitteln oder Planungsfehler (z. B. Kollisionen) im Raum zu erkennen. Bei der 3D-Produktanalyse werden kleine Details, wie z. B. die Package-Anordnung im Motorraum, durch die 3D-Projektion besonders transparent. Erfahrungen in der Praxis zeigen allerdings, dass die stereoskopische Projektion trotz eines nur geringen Zusatzaufwandes in der Planung, nur bedingt genutzt wird.

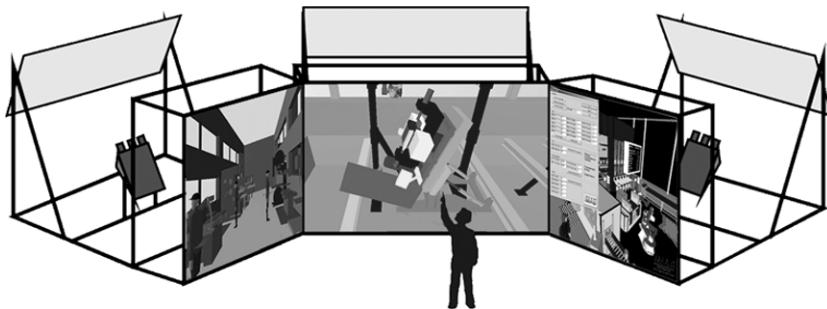


Abb. 4.45 Dreiseitige 3D-Projektion mit flexiblen einstellbaren Projektionswänden (Quelle: TU Clausthal, IMAB in Anlehnung an Fahlbusch 2001, S. 93)

Bei einem Walk Through, bei dem das Management oder die Kunden als die Entscheider den architektonischen Entwurf, das Layout oder den Gesamteindruck einer Fabrik begutachten und bewerten wollen, hat sich der Einsatz einer CAVE (deutsch: Höhle) bewährt. Eine CAVE ist, wie in Abbildung 4.45 dargestellt, ein Raum mit einer mehrseitigen 3D-Projektion.

Unterschieden werden 2-seitige (frontal, rechts oder links), 3-seitige (frontal, rechts, links – wie in Abb. 4.45 dargestellt), 4-seitige (zusätzlich oben), 5-seitige (zusätzlich unten) und 6-seitige (geschlossener Raum) Projektionsanlagen. Eine besondere Form ist die variable CAVE, bei der verstellbare Wände samt dazugehöriger Technik von einer großwandigen Fläche (180° Positionierung) zu einer umgebenden Projektion verstellt werden können.

Einen Atlas der VR-Installationen in Deutschland haben die Hochschule Mannheim und das Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach erstellt. Dieser Atlas lokalisiert deutschlandweit VR-Anlagen und gibt nähere Hinweise zu verwendeter Software, Einsatzzweck und Kontaktdaten (VDC 2012).

4.11.4 Interaktionsmedien

Die Bereitstellung neuer Projektionsmedien erfordert auch spezielle Interaktionsformen für den Umgang mit den 3D-Modellen. Für die Verbesserung der Interaktion entstanden in den vergangenen Jahrzehnten unterschiedliche Ein- und Ausgabegeräte für VR- und AR-Anwendungen. Zu den Eingabegeräten für die Erstellung von und die Navigation in 3D-Modellen zählen beispielsweise:

- *3D-Maus*

Sie ist am Markt in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich und ermöglicht über spezielle Bedienelemente (beispielsweise Drehknopf sowie programmierbare Funktionstasten) die intuitive und schnelle Navigation in einem 3D-Modell und die einfache Dateneingabe an einem CAD-Arbeitsplatz. 3D-Mäuse erlauben zumeist eine Steuerung in bis zu sechs Freiheitsgraden und besitzen benutzerdefinierbare Geschwindigkeitseinstellungen für die Bewegung im 3D-Raum.

- *Datenhandschuh (data glove)*

Beim Einsatz des auf die Hand gezogenen Datenhandschuhs werden auf intuitive Art und Weise durch Hand- und Fingerbewegungen die Orientierung im Raum und die Manipulation an 3D-Modellen möglich. Die Datenhandschuhe sind mit speziellen Sensoren besetzt, um Änderungen in Position und Orientierung zu erfassen und in das 3D-Modell zu projizieren. Positionsänderungen werden als Steuersignale an das 3D-Modell übertragen, so dass eine Interaktion mit dem 3D-Modell möglich wird. Zur Navigation in VR-Modellen kommen Datenhandschuhe oftmals in Kombination mit einem Datenhelm zum Einsatz (siehe Abb. 4.46). Datenhandschuhe können bei Bedarf auch ein taktiles Feedback unterstützen; dem Anwender wird eine Rückmeldung beim Anfassen der Objekte in der 3D-Welt gegeben. Die Realisierung des taktilen Feedbacks erfolgt auf der Basis unterschiedlicher technischen Lösungen zur Stimulation (beispielweise über Luftpölster (pneumatisch) oder über elektrische Reize).



Abb. 4.46 Head-Mounted Display (HMD) und Datenhandschuhe im Einsatz (Bergbauer 2002)

Für die Betrachtung von 3D-Modellen werden vor allem folgende Ausgabegeräte verwendet:

- *Positionsbrille*

Die Positionsbrillen verändern beim Wechsel der Blickrichtung des Betrachters die Perspektive. In Abhängigkeit vom verwendeten Projektionsverfahren (Aktiv- oder Passiv-Stereo) kommen unterschiedliche Brillen zum Einsatz.

Die farbfähige Passiv-Stereo-Projektion basiert auf der Trennung der Teilbilder auf optischem Weg durch die Polarisation von Licht und die Nutzung von Polarisationsfiltern. Die Bilder für das rechte und das linke Auge werden überlagert und das Licht linear oder zirkular polarisiert projiziert, d. h. durch ein optisches Gitter geleitet. Die Gitter (Polfilter) vor den Projektoren sind ebenso wie die dazu gehörigen Brillengläser um 90 Grad zueinander versetzt oder um 45 Grad gedreht, so dass jeweils nur das passend polarisierte Licht durchgelassen wird. Ändert der Betrachter bei linearer Polarisation seine Kopfhaltung, indem er z. B. den Kopf zur Seite neigt, stimmt die Polarisation zwischen Brille und Projektor nicht mehr überein; dies führt zum Verlust der Stereoinformation. Bei kreisförmiger (zirkularer) Polarisation kann der Betrachter seinen Kopf neigen, ohne dass der stereoskopische Eindruck verloren geht. Dies ist möglich, da die Polarisation des Lichtes nicht nur in eine einzige Richtung erfolgt. Diese Technologie erfordert aber eine höhere Präzision und eine feinere Abstimmung zwischen den Polarisationsfiltern in den Projektoren und der Brille.

Die ebenfalls farbfähige Aktiv-Stereo-Projektion nutzt eine spezielle

sogenannte Shutterbrille, deren Gläser aus zwei Flüssigkristallanzeigen bestehen, je eine für das linke und das rechte Auge. Diese können elektronisch zwischen durchlässig und undurchlässig umgeschaltet werden, so dass sich wahlweise das linke oder das rechte Auge abdunkeln lässt. Dadurch wird ein stereoskopisches Sehen an einem Monitor möglich, auf dem abwechselnd das linke und dann das rechte Teilbild angezeigt wird. Die Brille wird synchron dazu umgeschaltet. Damit das Umschalten für den Betrachter nicht wahrnehmbar ist, muss der Wechsel zwischen den Teilbildern sehr schnell erfolgen. Ein Monitor muss daher mindestens 120 Hz Vertikalfrequenz darstellen, um in Verbindung mit der Brille noch effektive 60 Hz zu liefern (für jedes Auge 60 Bilder pro Sekunde). Da das Umschalten der Shutter-Brille an die Bildwiederholfrequenz gekoppelt ist, muss eine Verbindung zwischen Grafikkarte und Brille bestehen, um eine Synchronisation zu gewährleisten. Das geschieht entweder per Kabel oder per Infrarot Sender und entsprechendem Empfänger an der Brille.

- *Head-Mounted Display (Datenbrille)*

Das Head-Mounted Display (HMD) projiziert ein 3D-Bild direkt vor die Augen des Betrachters, ohne dass der Betrachter die reale Welt wahrnimmt. Er taucht in die virtuelle Welt ein, so dass für ihn das Gefühl entsteht, sich mitten in ihr zu befinden. Ein HMD bietet zurzeit den höchsten möglichen Grad an Immersion. Das Ausgabegerät wird je nach Ausstattung als vollständig abschließender Helm (vgl. Abb. 4.46) oder auch als leichtere Brille mit zwei Displays, auf die der Computer die Bilder erzeugt, angeboten. Die Bewegungen des Kopfes werden über eine entsprechende Sensorik mitgeführt, so dass sie zu direkten Sichtänderungen im Modell führen.

Spezielle Brillen erlauben den Einsatz im Bereich AR, um computergenerierte Bilder zu realen Objekten als ergänzende Informationen einzublenden (vgl. beispielsweise Abb. 4.34 und 4.36), gleichzeitig aber auch die reale Welt wahrzunehmen. Abbildung 4.47 verdeutlicht den Einsatz eines speziellen AR-Systems für Reparaturzwecke bei der Volkswagen AG bestehend aus einer Weste mit Datenbrille ergänzt um spezielle Technologien zur Sprachein- und -ausgabe sowie zur Funkübertragung. Alternativ werden ultra-mobile PCs mit Kamera ausgerüstet und ergänzt um einen zusätzlichen stationären PC als AR-Systeme eingesetzt (siehe Abb. 4.48).

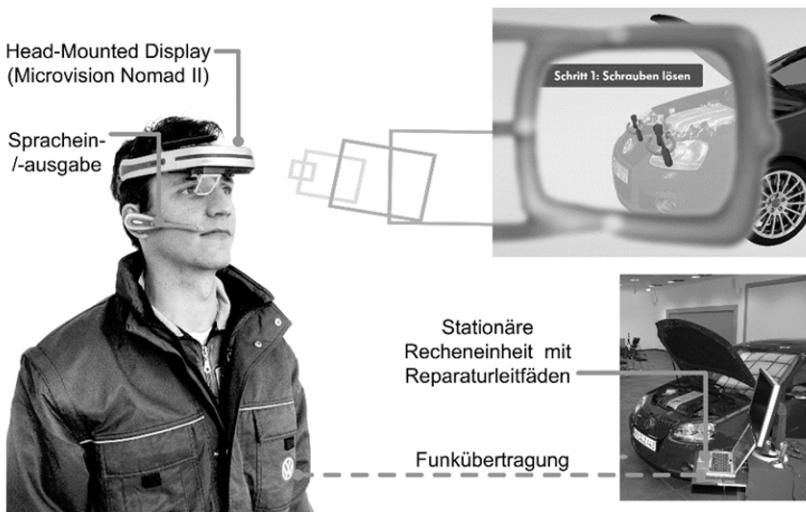


Abb. 4.47 Anwendung eines AR-Systems bestehend aus einer Weste mit Datenbrille (Quelle: Volkswagen AG)

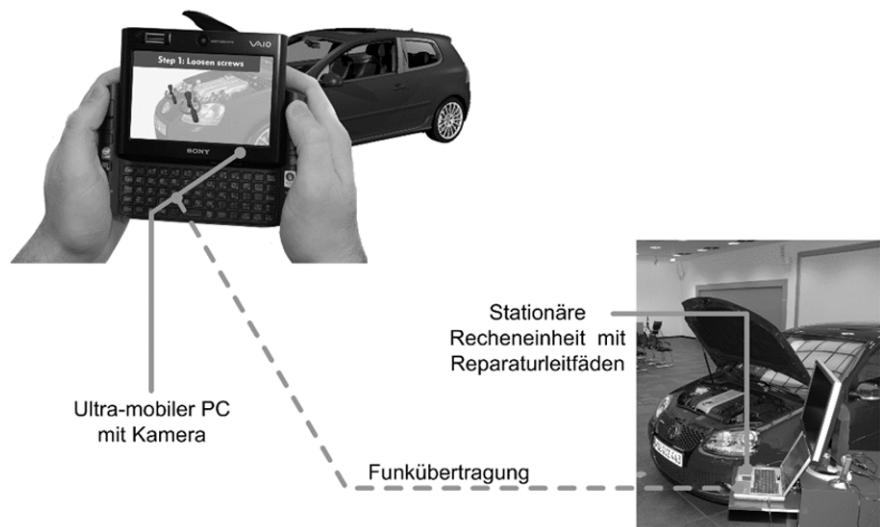


Abb. 4.48 Einsatz eines ultra-mobilen PCs mit Kamera als AR-System (Quelle: Volkswagen AG)

Aktuelle Arbeiten zielen darauf ab, möglichst ohne Interaktionsmedien wie 3D-Brille oder Datenhandschuh mit dem 3D-Modell zu interagieren.

Mittels Kameras sollen die Bewegungen von Händen und Fingern in Echtzeit erkannt und die Informationen an den Computer übertragen werden (vgl. Fraunhofer 2016). Ein Beispiel für eine derartige Lösung ist das in Abbildung 4.49 dargestellte Konzept zum Erkennen von Gesten mittels Kamera; die Bedeutung der Gesten in der 3D-Software ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Diese Entwicklung der Volkswagen AG gemeinsam mit Siemens soll mittelfristig in bestehende Planungswerzeuge integriert werden. Damit rückt die Vision des nahtlosen Übergangs von Virtualität und Realität ein Stück näher. Inwieweit sich diese Technik im Collaborative Engineering durchsetzen wird, bleibt abzuwarten.

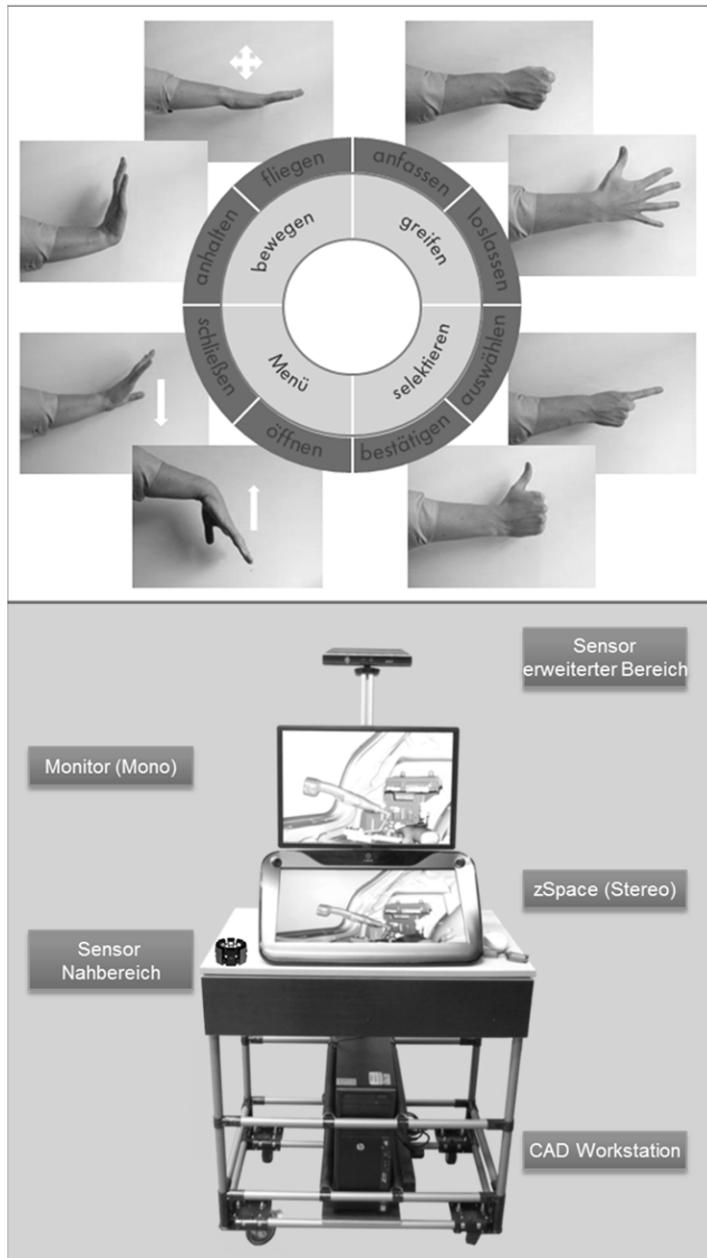


Abb. 4.49 Lösungskonzept zur Gestensteuerung (Quelle: Volkswagen AG)

5 Datenmanagement und Softwarewerkzeugklassen

Der Begriff *Datenmanagement* wird im Zusammenhang mit der Digitalen Fabrik (DF) bereits in der VDI-Definition (vgl. auch Abschnitt 1.2.1) verwendet, in der von einem umfassenden Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen gesprochen wird, „die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ (VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 3).

In den nachfolgenden Ausführungen werden die Aufgaben des Datenmanagements, die notwendigen Softwarewerkzeugklassen in den Unternehmen sowie technische Möglichkeiten zur Umsetzung des Datenaustausches zwischen Softwarewerkzeugen (Synonym: IT-Werkzeuge, IT-Systeme, IT-Anwendungen) behandelt und auch der Begriff der Durchgängigkeit diskutiert. Das Kapitel 5 ersetzt aber keineswegs umfassende Werke zur Einführung von Datenbanksystemen oder einschlägige Literatur zu den jeweiligen Softwarewerkzeugen, auf die an entsprechender Stelle verwiesen wird. Auf Aspekte des Informationsmanagements in Unternehmen wird nur eingegangen, wenn daraus Anforderungen an das Datenmanagement abzuleiten sind. Bezuglich der Aufgaben des Wissensmanagements sei auf Abschnitt 4.9.2 verwiesen.

5.1 Das Datenmanagement in der Digitalen Fabrik

5.1.1 Begriffsdefinition und Abgrenzung

Zur genaueren Begriffsdefinition des Datenmanagements werden im Folgenden zunächst die Begriffe *Daten*, *Information* und *Wissen* in Anlehnung an Nonaka und Takeuchi (1997) und North (2011) abgegrenzt, da sich in den Anwendungen trotz Normierung keine einheitliche Begriffsverwendung durchgesetzt hat.

Daten bestehen aus informationstechnischer Sicht aus analogen oder digitalen Signalen oder Zeichen, die nach bestimmten Regeln (Syntax) zu Zeichenfolgen zusammengesetzt werden. Sie dienen der Repräsentation und Darstellung von Information zum Zwecke der Verarbeitung. Dies be-

deutet, dass sie keine Verwendungshinweise enthalten. Somit können die Daten auf unterschiedliche Weise interpretiert werden, was ggf. zu Missverständnissen und Fehlern führen kann. Die Zeichenkette „JAGUAR“ als Datum lässt noch keinen Hinweis dahingehend zu, welche Information mit diesem Datum übertragen werden sollte (d. h. ob hier das Tier oder die Automarke gemeint ist).

Information hingegen entsteht durch die Interpretation von Daten (im obigen Fall durch die Interpretation der Zeichenkette und zusätzlicher Metainformation – beispielsweise aufgrund eines zugehörigen Satzkontextes: der JAGUAR steht in der Garage). Sie beinhaltet somit die Bedeutung der Daten bzw. der Zeichenfolge (Semantik) im jeweiligen Kontext. Information wird durch Daten codiert und umfasst Aussagen und Beschreibungen zu Eigenschaften und Strukturen bestimmter Gegenstände oder Sachverhalte; sie wird mitgeteilt und entgegengenommen und ist aufgrund der Sender-Empfänger-Relation zweckgebunden. Information ist kommuniziertes und formalisiertes Wissen und dient der Wissensvermehrung.

Wissen geht somit eine Stufe weiter, denn es verknüpft eine Vielzahl von Informationen, die zusammengenommen wiederum neue Aussagen ergeben. Wissen ist allerdings an das Bewusstsein gebunden und entsteht beim Bewusstseinsträger (d. h. beim Menschen als Individuum bzw. bei Kollektiven von Individuen); es ist oft nur schwer formalisier- und kommunizierbar. Explizites Wissen ist formal beschreibbar, dokumentierbar und damit vermittelbar. Implizites Wissen (Erfahrungswissen, soziale Kompetenz) hingegen ist schwer fassbar und somit auch kaum formalisierbar. Probst, Raub und Romhardt bezeichnen Wissen auch als „Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.“ (Probst et al. 2012, S. 23).

Abgeleitet aus dem Expertenwissen in den Unternehmen, den in den einzelnen Prozessschritten anfallenden Informationen und den Informationsflüssen zwischen den einzelnen Prozessschritten der Produkt- und Produktionsplanung ergeben sich die im Rahmen der DF zu verwaltenden Informationen und Daten.

Datenmanagement ist ein übergeordneter Begriff für alle anfallenden organisatorischen und technischen Aufgaben, die der Konzeption und dem Entwurf der Daten sowie ihrer Haltung und Bereitstellung dienen.

Zu den Aufgaben des Datenmanagements zählen die *Datenorganisation und -strukturierung*, die sich mit der Konzeption und dem Entwurf von Datenmodellen beschäftigen, die *Datenverwaltung*, die die Wartung und Pflege der zugehörigen Datenbanken und Datenmodelle sowie die Überwachung der Datenqualität beinhaltet, sowie die *Datenaufbereitung* und die *Datenanalyse* als ergänzende Dienstleistungsfunktionen (in Anlehnung an Wenzel und Meyer 1993, S. 347 ff.). Die *Datenaufbereitung* umfasst ihrerseits die Aufgaben Datenerhebung, -überprüfung, -bereinigung und -verdichtung. Die *Datenanalyse* beinhaltet die für die jeweiligen Anwendungen notwendigen Auswertungen einer Datenbasis zur Datennutzung in anwendungsspezifischen Kontexten (in Anlehnung an Wenzel und Meyer 1993, S. 347 ff.).

Die VDI 4499 Blatt 1 (2008, S. 3) weist des Weiteren darauf hin, dass die Integration der Modelle, Methoden und Werkzeuge in der DF über ein *durchgängiges* Datenmanagement erfolgen soll.

Ein *durchgängiges* Datenmanagement ist durch einen medienbruchfreien Datenaustausch zwischen allen Anwendungsprogrammen gekennzeichnet. Die technische Umsetzung der Durchgängigkeit kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen (vgl. hierzu Abschnitt 5.2).

Für die Speicherung und Verwaltung von umfangreichen Daten werden heute sogenannte *Datenbanksysteme* eingesetzt. Diese bestehen (vgl. u. a. Herold et al. 2012, S. 502) aus:

- Den Daten, die nach bestimmten Regeln strukturiert in einer oder mehreren *Datenbanken* abgelegt sind (auch *Datenbasis* oder *Datenpool* genannt).
- Dem *Datenbankmanagementsystem* (Database Management System – DBMS) oder Datenbankverwaltungssystem, das die Datenbestände verwaltet. Das Datenbankmanagementsystem stellt den Zugriff auf die Datenbasis sicher und bietet beispielsweise Such-, Filter-, und Sortierungsfunktionen an.

Einem Datenbanksystem liegt in seiner prinzipiellen Struktur zumeist die vom ANSI/SPARC (ASNI/SPARC – American National Standards Institute/ Standards Planning and Requirements Committee) vorgeschlagenen Drei-Ebenen-Architektur zugrunde (vgl. beispielsweise Mertens et al. 2012, S. 43 ff.). Die interne Ebene behandelt die Daten in Bezug auf die Struktur der physischen Speicherung; die Beschreibung dieser physischen Datenorganisation erfolgt unter Verwendung von sogenannten Speicherbeschreibungssprachen (DSDL – Data Storage Description Language). Die

externe Ebene definiert die anwenderbezogene Perspektive auf die Daten; sie wird über Datenmanipulationssprachen (DML – Data Manipulation Language,) und Abfragesprachen (QL – Query Language) umgesetzt. Die zwischen der internen und externen Ebene liegende konzeptuelle Ebene formuliert die Daten mit ihren logischen Zusammenhängen kontextunabhängig unter Verwendung einer Datendefinitions- oder -beschreibungssprache (Data Definition / DDL – Description Language).

Datenbanken (vgl. auch Wegener 2001) bieten die Möglichkeit der persistenten (nicht-flüchtigen) Speicherung der Daten (z. B. auf Festplatte) in einem programmunabhängigen, neutralen Format, so dass unterschiedliche Anwendungsprogramme auf die Datenbank zugreifen können. Die Abfrage der Daten erfolgt über spezifische Abfragemechanismen, die das DBMS zur Verfügung stellt. Gleichzeitig stellt das DBMS jederzeit die Konsistenz (Widerspruchsfreiheit) der Daten sicher, auch wenn von unterschiedlichen Anwendungen Transaktionen auf der Datenbank durchgeführt werden.

Mittels Datenmodellierung wird ein für die Betrachtung relevanter Realitätsausschnitt (z. B. ein Produkt oder ein Bauteil) in der Datenbank abgebildet. *Datenmodelle* beschreiben die Eigenschaften der Datenelemente sowie die Beziehungen zwischen ihnen und bestimmen für die Datenelemente die Auswirkungen von Speicherungs-, Such-, Änderungs- und Löschfunktionen einschließlich notwendiger Konsistenzbedingungen. Sie werden in der Definitionsphase als konzeptionelles oder konzeptuelles Modell entwickelt und sind die Basis für den Entwurf und die Implementierung der Datenbanken. Gängige Datenmodelle sind relationale und objektorientierte Datenmodelle; sie unterscheiden sich in der Art und Weise der Betrachtung des zu modellierenden Weltausschnitts. Für die Modellierung stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung; relationale Modelle werden in der Regel unter Nutzung von ER-Modellen (ER – Entity Relationship, vgl. auch Abschnitt 4.4.2) aufgebaut; für objektororientierte Modellierung hat sich heute UML (vgl. auch Abschnitt 4.4) durchgesetzt.

Da es sich in der Definitionsphase – im Sinne der zu Beginn des Abschnitts dargestellten Differenzierung zwischen Information und Daten – eigentlich um eine Modellierung auf Informationsebene handelt, findet sich für die Erstellung des konzeptionellen Modells auch der Begriff *Informationsmodell*. Erst bei einer weiteren Detaillierung in Richtung Entwurf und Implementierung werden dann Wertebereiche, Schlüssel und Integritätsbedingungen ergänzt und Datenmodelle aufgebaut.

5.1.2 Anforderungen an das Datenmanagement aus Sicht der Digitalen Fabrik

Die allgemeinen Anforderungen an ein zweckmäßiges und aufgabenorientiertes Datenmanagement gelten in Analogie zu den Anforderungen, die an Datenbankmanagementsysteme zu stellen sind. Sie beziehen sich u. a. auf folgende Punkte (vgl. z. B. Mertens et al. 2012, S. 44-45):

- Sicherstellung der Korrektheit, Konsistenz, Vollständigkeit, Integrität und Unversehrtheit der Daten über eine zuverlässige Datenverwaltung: Ein Verlust oder eine Verfälschung der Daten aufgrund technischer Fehler, Fehleingaben, unzulässiger Operationen oder aufgrund von Fehlern, wenn mehrere Anwender auf gleiche Datenbestände zugreifen, ist zu vermeiden. Ergänzend kann hier die Gewährleistung der Ausfallsicherheit genannt werden, bei der nach einem Absturz die Konsistenz der Daten über geeignete Routinen wiederherzustellen ist.
- Sicherstellung der für den jeweiligen Anwendungskontext notwendigen Datenaktualität, Datenvielfalt (d. h. Gültigkeit der Daten für die Anwendung) und Datengenauigkeit (Detailierungsgrad oder auch Granularität der Daten) sowie einer nur geplanten und kontrollierten Datenredundanz: Die Redundanz von Daten ist auf ein kleinstmögliches Maß zu reduzieren bzw. – soweit möglich – ganz zu vermeiden, da das mehrfache Vorhandensein desselben Datums zu einem nicht zu unterschätzenden organisatorischen Mehraufwand bei der Aktualisierung der Daten führt und in der Regel ein erhebliches Fehlerpotenzial aufweist. Lediglich zum Zwecke der Sicherung und Archivierung von Daten sind Redundanzen herzustellen, wobei die hierfür erstellten Kopien stets getrennt von den originalen Daten aufzubewahren sind.
- Sicherstellung der Unabhängigkeit zwischen den Anwenderprogrammen und dem Datenbanksystem und damit der Art und Weise der Datenhaltung: Die Unabhängigkeit impliziert, dass lokale Änderungen auch nur lokale Auswirkungen nach sich ziehen. Gleichzeitig muss eine einfache Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit des Datenmodells (neue Objekte und Strukturrelationen) sichergestellt sein. Die daraus resultierenden Änderungen dürfen sich nur auf die Anwenderprogramme auswirken, die mit den neuen Objekten und Strukturen arbeiten.
- Gewährleistung einer komfortablen und flexiblen Verwendung des Datenbanksystems über leistungsfähige Zugriffsfunktionen wie Such- und Filterfunktionen oder auch Funktionen für spezifische Sichten der Nutzer in ihren jeweiligen Anwendungen.
- Gewährleistung des Schutzes der Daten durch Verhinderung ihrer unbefugten Verwendung und der Sicherheit der Daten durch Bewahrung

der Daten vor Verfälschung, Vernichtung und unberechtigtem Zugriff beispielsweise über ein flexibles Rollen- und Zugriffsrechtkonzept im Rahmen von Datensicherheitskonzepten (siehe unten).

Neben diesen allgemeinen Anforderungen an ein Datenmanagement sind im Kontext der DF aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungsprogrammen und der organisations- und unternehmensübergreifenden Unterstützung von Prozessen, beispielsweise zwischen OEM und Lieferanten, weitere spezifische Anforderungen zu benennen:

- Integrationsfähigkeit in und Anpassungsfähigkeit an die unterschiedlichen Schritte des Planungsprozesses (Bereitstellung von prozess- und nutzerspezifischen Sichten und Funktionen) sowie prozessspezifische und -übergreifende *Reportingfunktionalitäten*.
- Unternehmensübergreifende Konzepte zur Gewährleistung der *Datensicherheit* in Bezug auf die Integration von Kunden und Lieferanten und den unternehmensübergreifenden Datenaustausch: Beispielsweise müssen Datensicherheitskonzepte gewährleisten, dass interne Daten vor einem externen Zugriff geschützt sind. Datensicherung geht allerdings viel weiter und umfasst alle technischen, materiellen und organisatorischen Maßnahmen, „die Daten und Programme der einzelnen Benutzer wechselseitig vor unzulässigen Zugriffen schützen und gegen Zerstörung durch Fehlfunktionen der Rechenanlage oder Fehlbedienung des Benutzers absichern und zugleich die Anforderungen des Datenschutzes gewährleisten“ (vgl. Claus und Schwill 2006, s. v. Datensicherung).
- Systematisches und durchgängiges *Änderungs- und Konfigurationsmanagement* sowie Umsetzung eines entsprechenden Multi-User-Konzeptes, damit eine zeitliche parallele Bearbeitung und Nutzung der Daten möglich wird.

Mit dem Änderungsmanagement muss ein entsprechender Kommunikationsprozess über Änderungen zwischen den beteiligten Partnern sichergestellt sein. Dabei unterscheidet sich ein Änderungsmanagement in Abhängigkeit von der Art der Datenverwaltung (zentral, verteilt), von der Nutzung replizierter (mehrfach gespeicherter) Datenbestände und von Zeitpunkt und Umfang der Änderungen. In der Empfehlung der Automobilindustrie zum Thema Engineering Change Request (ECR) (SASIG 2009a) wird beispielsweise zwischen einem Rollback und einer Revision unterschieden. Ein Rollback beschreibt eine Situation, in der ein Prozess und damit einzelne Aktivitäten abgebrochen und teilweise oder ganz wiederholt werden müssen. Eine Revision setzt im Gegensatz zu einem Rollback an fest definierten und geplanten Zeitpunkten ein; sie kann aber auch zu einer Wiederholung von Aktivitäten führen. In Ab-

hängigkeit von derartigen Prozesswiederholungen unterscheiden sich auch die Anforderungen an das Änderungsmanagement. In diesem Zusammenhang sei auf das im Januar 2010 von der Strategic Automotive Product Data Standards Industry Group (SASIG) gemeinsam mit der ProSTEP iViP Association und dem Verband der Automobilindustrie (VDA) erarbeitete White Paper zum Engineering Change Management (ECM) Reference Process (SASIG 2009b) sowie die bereits erwähnte Empfehlung für das Engineering Change Request (ECR) (SASIG 2009a) verwiesen.

- *Konfigurationsmanagement* (vgl. DIN ISO 10007 2004) erweitert im Prinzip das Änderungsmanagement um die Einbeziehung unterschiedlicher Konfigurationen zu einem Produkt, einem Dokument oder einer Software. Eine Konfiguration beschreibt dabei den Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem definierten Auslieferungsstatus. Die wichtigsten Aufgaben des Konfigurationsmanagements sind die Versionsverwaltung (Versionierung von Änderungen) und die Releaseverwaltung (Verwaltung der Auslieferungszustände).
- Umsetzung von *Archivierungskonzepten* für die Langzeitarchivierung (LZA) von Daten, d. h. die Sicherstellung der langfristigen Reproduzierbarkeit der Daten unabhängig von aktuellen Quellsystemen oder Speichersystemen (vgl. hierzu auch die Ergebnisse des VDA zur LZA von digitalen Produktdaten (VDA 4958 2005-2007)).

Für die Schaffung eines durchgängigen Datenmanagements im Rahmen der DF ist darüber hinaus zu beachten, dass es sich hier im eigentlichen Sinne um multidimensionale Informations- und Datenstrukturen handelt, die u. a. durch folgende Charakteristika geprägt sind:

- *Informationsobjekte*: Die zu verwaltenden Informationen zeichnen sich durch unterschiedliche Komplexität aus. Zum einen können vollständige Modelle und Dokumente (d. h. gekapselte Informationen) verwaltet werden (zum Dokumentenmanagement vgl. auch Abschnitt 5.3.5), zum anderen sind einzelne Daten zugreifbar.
- *Datengranularität*: Die Datenbestände zeichnen sich wiederum durch unterschiedliche Datengranularität (Körnigkeit der Daten) aus. So können beispielsweise Daten durch Extraktion aus vorhandenen Daten verdichtet werden und spezifische Kennzahlen als semantische Verknüpfung von vorliegenden Daten abgeleitet werden.
- *Zeitliche Varianz und Gültigkeit der Daten*: Dieser Aspekt bedingt Funktionen zur Bewertung der Validität von Daten sowie zur Historisierung und Versionierung, aber auch spezifische Funktionen für retrospektive und prospektive Betrachtungen.

Die Arbeit mit den Werkzeugen der DF erfolgt in kollaborativen Prozessen. Ein Collaborative Engineering (vgl. Abschnitt 4.9) ist grundsätzlich nur über die Herstellung und Wahrung von *Interoperabilität* zwischen den zu nutzenden Systemen, Werkzeugen, Methoden und beteiligten Personen zu erreichen (zum Begriff Interoperabilität siehe Abschnitt 5.2).

Zur Realisierung von *interoperablen Systemen* ergeben sich daher zusätzliche Anforderungen an die Umsetzung eines durchgängigen Datenmanagements: Damit die Daten von allen Teilnehmern in einem Netz aus interoperablen Systemen jederzeit aktuell zugänglich und transparent sind, kann es beispielsweise aus technischen Gründen, aus Performance- oder Datensicherheitsgründen notwendig werden, bewusst redundante Daten vorzuhalten und mit replizierten Datenbeständen zu arbeiten. Dies können zum Beispiel Dateien in verschiedenen Formaten oder aus verschiedenen Zuständigkeitsbereichen sein, die den gleichen Inhalt aufweisen. Diese Anforderungen erfordern erweiterte Datenmanagementfunktionen, da Redundanzen immer die Gefahr beinhalten, dass Änderungen nicht an allen relevanten Datenbeständen durchgeführt werden. Hieraus ergibt sich die Gefahr, dass mit veralteten Daten gearbeitet wird, obwohl bereits neuere Daten vorliegen.

Anzahl und Art der Schnittstellen zwischen den interoperablen Werkzeugen bestimmen den Integrationsansatz (zu den unterschiedlichen Integrationsansätzen vgl. VDI 4499 Blatt 3 2016). Eine *vollständige Integration* unterschiedlicher Softwarewerkzeuge impliziert ein einziges Datenbanksystem, das alle Daten möglichst redundanzfrei speichert. Dieser Fall kommt allerdings in der Praxis aus folgenden Gründen nicht vor:

- Ein Unternehmen arbeitet in der Regel bereits seit Jahren mit unterschiedlichen Softwarewerkzeugen und besitzt eine mehr oder weniger individuell ausgeprägte IT-Infrastruktur.
- Die Daten der einzelnen Softwarewerkzeuge sind in der Regel nicht redundanzfrei.
- Die Softwarewerkzeulgüteranten unterscheiden sich zumeist. Die einzelnen Werkzeuge besitzen somit unterschiedliche Datenverwaltungssoftware und Dateiformate.
- Eine Zusammenarbeit zwischen mehreren Unternehmen erfordert in der Regel bereits aus organisatorischen und sicherheitstechnischen Gründen unabhängige Datenbestände.
- Aus technischen Gründen oder aus Performancegründen kann es notwendig sein, dass Softwarewerkzeuge für ihre jeweilige Programmfunctionalität speziell ausgerichtete und optimierte Datenstrukturen enthalten.

Bei der *Kopplung* mehrerer Softwarewerkzeuge (vgl. auch Abschnitt 5.2.1) werden diese auf informationstechnischer Ebene miteinander verknüpft. Die *direkte Kopplung* verbindet die Ein- und Ausgabeschnittstellen von zwei oder mehreren Softwarewerkzeugen auf direktem Weg. Bei der direkten Verknüpfung von n Softwarewerkzeugen ist dann zwischen jedem der Programme eine Kopplung zu implementieren, so dass im ungünstigsten Fall $n*(n-1)/2$ Kopplungen umgesetzt werden müssen. Die *indirekte Kopplung* über eine zentrale Kommunikationslösung erfordert die Anbindung der Softwarewerkzeuge an eine gemeinsame Integrationsplattform, über die die Daten kontrolliert ausgetauscht werden können. Dies setzt aber nicht zwangsläufig ein gemeinsames Datenmodell und schon gar nicht eine gemeinsame Datenbank voraus.

In Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen eines Unternehmens hinsichtlich seiner organisatorischen Abläufe, seiner funktionalen Restriktionen und seiner technologischen Ist-Situation entstehen beliebig viele Mischlösungen (siehe Abb. 5.1).

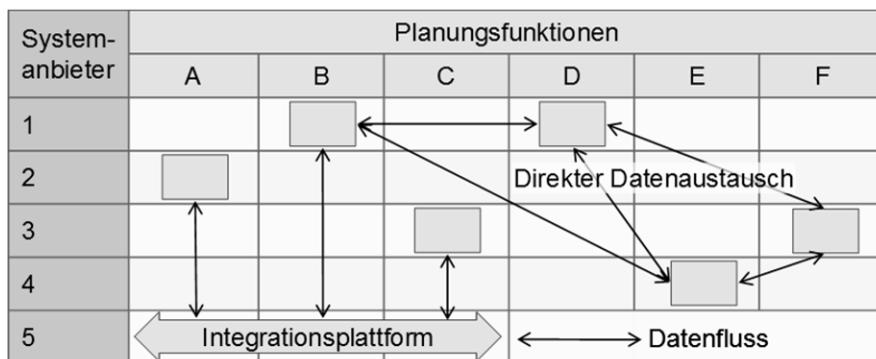


Abb. 5.1 Integrationsmöglichkeiten für Modelle und Werkzeuge in der DF (in Anlehnung an Petzelt und Deuse 2008, S. 42)

Bei der Umsetzung von Integrationslösungen kann zwischen einer Integration über Bestandskomponenten (Dateien oder Datenbanken), über Funktionsaufrufe, über eine Integrationsplattform mit spezifischen Adapters für jedes anzubindende Werkzeug oder auf Basis eines PLM-Systems unterschieden werden (vgl. Abb. 5.2). Umfassende Ausführungen hierzu sind der VDI 4499 Blatt 3 (2016) zu entnehmen.

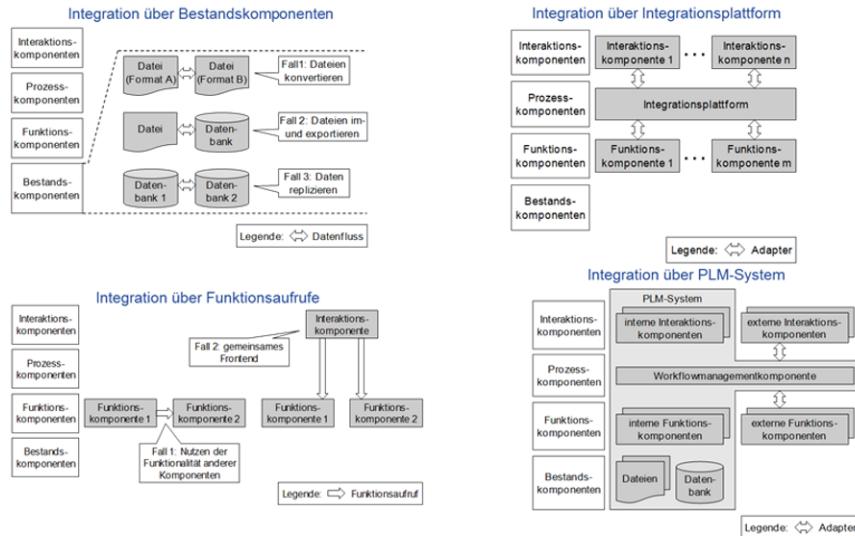


Abb. 5.2 Umsetzung der Integration (in Anlehnung an VDI 4499 Blatt 3 2016, S. 12)

Darüber hinaus ist die zeitliche Beziehung der zu betrachtenden Softwarewerkzeuge zu unterscheiden. Zum einen kann die Übertragung von Informationen in einem definierten Format nur zu bestimmten Zeitpunkten (*asynchron*) vorgesehen sein. Die Datenaktualität kann in diesem Fall eingeschränkt sein, da Datenänderungen, die zwischen zwei Datenaustauschzeitpunkten liegen, erst beim nächsten Datenaustausch berücksichtigt werden. Zum anderen kann auch ein *synchroner* Datenaustausch zwischen mehreren Softwarewerkzeugen vorliegen. In diesem Fall sind Interaktionen der Softwarewerkzeuge in Echtzeit - und falls die IT-Systeme mit ihren Datenbeständen *online* gekoppelt werden – auch ein Zugriff auf die aktuellen Datenbestände der jeweils anderen IT-Systeme möglich. Bei einer Online-Anbindung verschiedener Softwarewerkzeuge sind ggf. weitere spezifische Anforderungen an das Datenmanagement zu berücksichtigen. Hierzu zählen beispielsweise die Sicherstellung von kurzen Synchronisationszeiten bei Zustandsänderungen oder auch die Gewährleistung der Wiederherstellung abgesicherter, synchronisierter Datenbestände bei Kommunikationsabbrüchen oder Systemausfällen.

Alle in diesem Kapitel dargestellten Anforderungen gelten für interoperable Systeme, wie sie beispielsweise in Konzepten zur DF zu finden sind. Für den Digitalen Fabrikbetrieb nennt die VDI 4499 Blatt 2 (2011) - mit Ausnahme der Bereitstellung von Schnittstellen zu mechatronischen

Bibliotheken - keine zusätzlichen, spezifischen Anforderungen an das Datenmanagement.

Die Digitalisierungs- und Integrationsbestrebungen im Rahmen von Industrie 4.0 fordern die Bereitstellung eines Internets der Dinge (Internet of Things) und Dienste im Sinne einer umfassenden Kommunikationsinfrastruktur (vgl. auch Bischoff et al. 2015). Technische Prozesse, Ressourcen und Geschäftsprozesse sowie die jeweiligen Informations-, Kommunikations-, Steuerungs- und Managementsysteme (auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen von der Aktor- und Sensorebenen bis zur Unternehmensplanungsebene) werden miteinander verknüpft. (vertikale Integration, vgl. auch acatech und Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft 2013, S. 24). Als horizontale Integration wird in diesem Kontext laut acatech und Forschungsunion (2013, S. 24). "die Integration der verschiedenen IT-Systeme für die unterschiedlichen Prozessschritte [...] sowohl innerhalb eines Unternehmens [...] aber auch über mehrere Unternehmen (Wertschöpfungsnetzwerke) hinweg zu einer durchgängigen Lösung“ verstanden. Diese Integrationsbestrebungen gehen deutlich weiter als die Integrationslösungen in der DF und sollen letztendlich zu einem uneingeschränkten Zusammenspiel von Realität und Virtualität führen.

Mit diesen Entwicklungen entstehen laut Freytag (2014) große Datens Mengen (engl. Volume) in unterschiedlichen Datenformaten (engl. Variety), unterschiedlicher Aktualität (engl. Velocity) und Glaubwürdigkeit (engl. Veracity), die verwaltet und entsprechend der Bedarfe verarbeitet werden müssen. Als wesentliche Kategorien der Verarbeitung dieser sogenannten Big Data nennt Freytag (2014) (1) Nachverfolgen und Auswerten, (2) Suchen und Identifizieren, (3) Analysieren und (4) Vorhersagen und Planen. Aus Sicht der Anwendung formuliert Freytag (2014) zudem drei Anforderungen: (1) Schnell (engl. fast): Schnelligkeit der Spezifikation und Ausführung von Aktivitäten in den vier Verarbeitungskategorien, (2) Flexibel (engl. flexible): Flexibilität in Bezug auf neue Anforderungen und Aktivitäten sowie (3) Fokussiert (engl. focused): Fokussierung der Aktivitäten auf die relevanten Daten und Verarbeitungsaspekte zur Erreichung einer aufwandsarmen Verarbeitung. Die Anforderungen an ein Datenmanagement, die zu Beginn des Abschnittes aufgeführt sind, gelten in Analogie auch für Big Data, erfordern aber effiziente IT-Konzepte. Zudem wird bei der Verarbeitung von Produktions- und Sensordaten Echtzeitfähigkeit gefordert, bei der Verarbeitung personenbezogener Daten sind geeignete Datensicherheits- und Datenschutzkonzepte wesentlich. Ausführliche Diskussionen zum Thema Big Data im Kontext Industrie 4.0 sind beispielsweise Vogel-Heuser et al. (2017) zu entnehmen. In dem Statusreport des VDI/VDE (2016) sind zudem unterschiedliche Anwendungsfälle im Kontext von Big Data zusammengestellt.

5.2 Interoperabilität und Integrationsebenen

5.2.1 Begriffsdefinition

Interoperabilität bezeichnet allgemein die Fähigkeit der Zusammenarbeit unterschiedlicher Systeme, zu denen technische oder EDV-technische Systeme sowie Organisationen sowohl auf administrativer als auch auf personaler Ebene zählen. Ziel der Interoperabilität ist ein effizienter, zielgerichteter Austausch von Information zum Zweck ihrer nahtlosen Nutzung und Weiterverarbeitung. Interoperabilität zwischen Systemen basiert demnach auf der Entstehung, dem Austausch und der Verwendung von Zeichen. Ihre Umsetzung beinhaltet entsprechend der Semiotik (Lehre von den Zeichen) syntaktische, semantische und pragmatische Aspekte.

Interoperabilität kann differenziert werden nach *syntaktischer Interoperabilität* (Sicherstellung der technischen Voraussetzungen zur Zusammenarbeit auf Zeichen- und Datenebene), *semantischer Interoperabilität* (Sicherstellung der richtigen Information für die jeweils zu integrierende Anwendung) und *pragmatischer Interoperabilität* (Sicherstellung der richtigen Interpretation und Verwendung der Information seitens des Empfängers).

Sie betrifft sowohl Planungswerzeuge und Austauschformate der beteiligten Fachbereiche, Planungsdisziplinen und Kooperationspartner als auch die notwendigen organisatorischen Maßnahmen für die Planungsprozesse (vgl. Wenzel et al. 2005).

Auf der *syntaktischen Ebene* werden die technische Datenintegration, Austauschformate, Kommunikationsprotokolle und die Systemarchitektur realisiert (Wie soll die Datenübertragung erfolgen? Welches Protokoll wird verwendet? Welche Systemarchitekturvariante ist sinnvoll?). Die technische Lösung wird bestimmt durch den geplanten Integrationsgrad der Werkzeuge und deren kopplungsrelevante Eigenschaften (Besitzen die mit den Werkzeugen zu erstellenden bzw. erstellten Modelle ein Zeitverhalten, d. h. sind ihre Modelle statisch oder dynamisch? Sind die Werkzeuge in ihrer Funktionalität skalierbar? Sind die Schnittstellen der Werkzeuge offen zugänglich? Sind die Werkzeuge erweiterbar?).

Auf *semantischer Ebene* wird die richtige Bedeutung der Daten im vernetzten Kontext für die jeweiligen zu integrierenden Anwendungen sichergestellt und die verwendeten unterschiedlichen Sichten und Modellierungsparadigmen der Werkzeuge (z. B. CAD- vs. Simulationswerkzeug) zueinander in Beziehung gesetzt. Die Definition der gemeinsamen semantischen Basis erfolgt beispielsweise über Modellierungskonventionen, Me-

tamodelle oder Ontologien zur Strukturierung der Begrifflichkeit der betrachteten Domäne.

Modellierungskonventionen werden getroffen, um die Weltsichten und Vorgehensweisen verschiedener an einem Prozess beteiligter Partner aufeinander abzustimmen und zu homogenisieren. Hierzu zählen beispielsweise spezielle Bausteinbibliotheken (wie beispielsweise der VDA-Baustein-Kasten, vgl. Abschnitt 4.10), Referenzmodelle und Konventionen zur Modellerstellung und -nutzung.

Die *Metamodellierung* (Metainformationen oder -modelle sind zusätzliche erklärende Informationen oder Modelle über die (Daten-)Modelle) umfasst Regelwerke und Interpretationsvorschriften zur Abbildung der Modelle aufeinander. Hierzu zählen übergreifende Modellierungsparadigmen oder auch konfigurierbare Mappingmechanismen.

Unter einer *Ontologie* sind formale Begriffsmodelle zu verstehen, die einen Bezug zwischen Begriffen und den jeweils zugeordneten Dingen in den betrachteten Welten (hier: Werkzeuge) herstellen und somit den Austausch von Informationen erleichtern. Ontologien werden durch eine logische Theorie ausgedrückt, die durch ein Vokabular (Worte) und eine Menge an logischen Aussagen zu der betrachteten Domäne bestimmt wird (zum Begriff Ontologie vgl. auch Mädche et al. 2001). Mit der Anwendung einer Ontologie soll die Anzahl möglicher Beziehungen zwischen Wörtern und Dingen, die der Empfänger einer Nachricht für sich als gültig interpretieren kann, reduziert werden. Ontologien werden beispielsweise bei Wissensmanagementlösungen, im E-Learning und im Semantic Web eingesetzt. Lösungskonzepte für die DF auf der Basis von Ontologien sind z. B. in Szulman et al. (2005) dargestellt; für Produktmodelle wird z. B. in Hahn (2005) eine Beschreibung unter Nutzung von Ontologien diskutiert. Die Komplexität der Betrachtungsgegenstände in der DF und die Terminologiediskrepanzen in und zwischen Unternehmen haben bisher allerdings zu keinen branchenweit akzeptierten ontologiebasierten Lösungen geführt.

Die Integration auf *pragmatischer Ebene* stellt sicher, dass die Information im richtigen Kontext Verwendung findet, die mit der Information beabsichtigte Handlung durchgeführt werden kann und Fragen der Vorgangsabwicklung, der Rollendefinition sowie der Zugriffsrechtsregelung angemessen gelöst sind. Die Integration auf pragmatischer Ebene wird beispielsweise durch ein geeignetes Workflowmanagement (vgl. Abschnitt 4.9.3) unterstützt.

5.2.2 Festlegung eines allgemeinen Integrationsrahmens für die Digitale Fabrik

Einen allgemeinen Integrationsrahmen, der ausgehend von einer strategischen und organisatorischen Ebene innerhalb eines Unternehmens die Vorgaben für die informationstechnische Integration ableitet, verdeutlicht Abbildung 5.3. Im Folgenden werden die einzelnen Ebenen des Integrationsrahmens in Anlehnung an Wenzel (2004) kurz erläutert.

Auf der *strategischen* Ebene werden die mit der DF verfolgten Ziele, die (Dienst-)Leistungen und einzuleitenden Maßnahmen in Bezug auf die Unternehmenskultur festgelegt. Die Ziele beziehen sich auf den mit der DF erwarteten Nutzen wie Verkürzung von Entwicklungszeiten, Verbesserung der Planungsqualität oder Einsparung von Kosten der Produkte und Dienstleistungen (vgl. Kap. 3). Über die Unternehmenskultur sind die geplanten neuen Formen der Kollaboration strategisch zu motivieren, die daraus resultierenden Veränderungen im Sinne einer Verbesserung der unternehmensinternen Abläufe (Vermeidung von Redundanzen, Standardisierung von Arbeitsabläufen) anzusprechen und vertrauensbildende Maßnahmen (z. B. Aufzeigen der Nachhaltigkeit der Veränderung) durchzuführen.

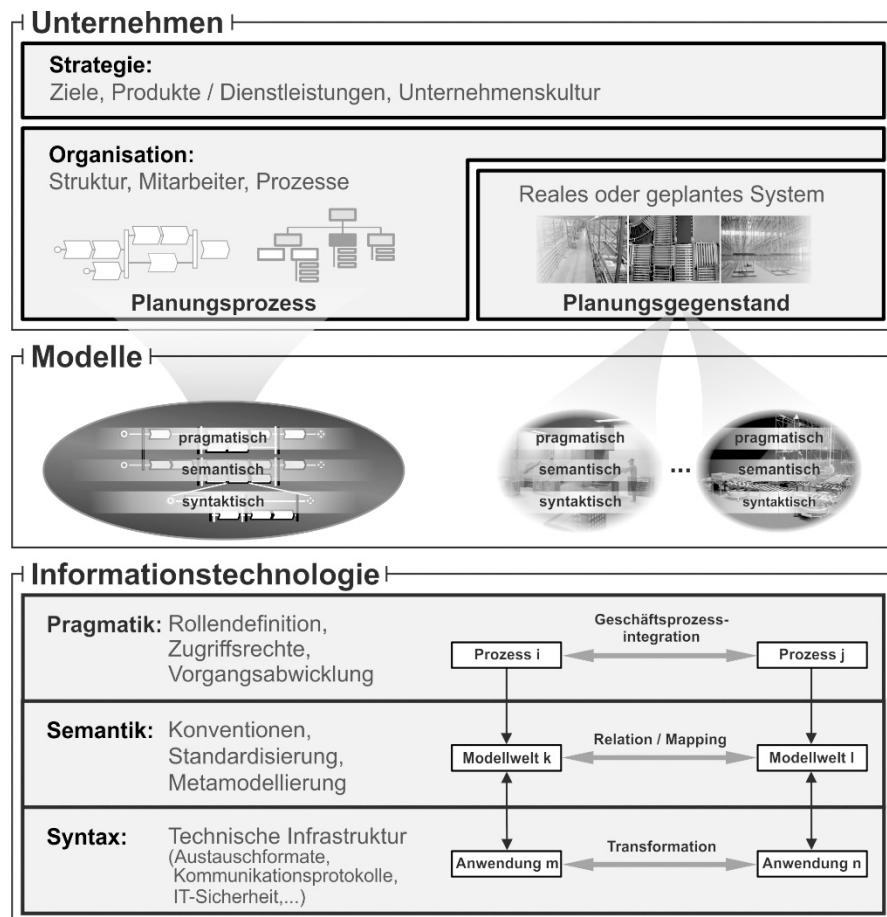


Abb. 5.3 Integrationsrahmen für die DF (in Anlehnung an Wenzel 2004, S. 56)

Die *organisatorische* Integration behandelt den Umfang, in dem die Werkzeuge in die Organisation des Unternehmens eingebunden sind, und die Art und Weise, wie ihre Nutzung die organisatorischen Abläufe beeinflusst (vgl. hierzu auch Kap. 6). Im Hinblick auf die Organisationsstruktur können Konzentration auf Kernkompetenzen, Teamorientierung und Selbstorganisation notwendige Diskussionspunkte sein. In diesem Zusammenhang sind auch Rollen und Autorisierungen und sich ggf. verändernde Handlungsspielräume und Arbeitsinhalte abzustimmen. Das gemeinsame Ziel ist ein KVP. Kooperationsbereitschaft ist Bedingung; Fragen der Mitbestimmung sind ggf., Fragen der Qualifikation in jedem Fall zu klären. Der Grad der Veränderung für einzelne MitarbeiterInnen ist bestimmt

durch die im Vorfeld bereits vorhandene Vernetzung der Prozesse der Planung und Betriebsführung. Über die organisatorische Integration wird auch die Gestaltung der eigentlichen Prozesse vorgenommen. Wichtig sind die Standardisierung von Arbeitsweisen und Kommunikationswegen zur Vermeidung von Doppelarbeit und unnötiger Datenredundanz sowie die Festlegung von Terminologien und Konventionen beispielsweise für die in den einzelnen Funktionsbereichen (wie Konstruktions-, Planungs- oder auch Simulationsabteilung) tätigen Modellentwickler.

Die organisatorische Integration legt die Anforderungen an das IT-System fest; Vernetzungsgrad und Zeitverhalten der Arbeitsabläufe beeinflussen die Form der Integration auf Werkzeugebene und bestimmen die Komplexität der Beziehungen der Werkzeuge zueinander. Bei den zu vernetzenden Modellen handelt es sich – wie in Abschnitt 4.10 bereits dargelegt – um Modelle zur Abbildung der zu untersuchenden Systeme und um Modelle, die die Prozesse der Planung und Betriebsführung beschreiben. Die *informationstechnische Integration* erfolgt über die in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Ebenen der Interoperabilität (Syntax, Semantik, Pragmatik).

5.2.3 Beispiel eines Ordnungsrahmen zur Schaffung interoperabler Modelle und Systeme

Die im jeweiligen Unternehmenskontext notwendigen Maßnahmen zur Schaffung interoperabler Modelle und Systeme für die DF unterscheiden sich in Abhängigkeit von den in Abschnitt 5.2.1 erläuterten Ebenen der Interoperabilität, von der Art der Modelle und ihrem Nutzungszeitraum im Anlagenlebenszyklus und vom Lebenszyklus eines Modells selbst.

Im Folgenden wird beispielhaft ein Ordnungsrahmen für Maßnahmen vorgestellt, welche die Voraussetzungen einer in die DF integrierten Modellbildung und -nutzung für fabrikplanerische Aufgaben (beispielsweise Erstellung und Verwendung eines Simulationsmodells) schaffen (Tabelle 5.1). Für die verschiedenen Phasen des Anlagenlebenszyklus ist dieser Ordnungsrahmen entsprechend zu erweitern.

Zur Modellbildung und -nutzung werden für den Ordnungsrahmen folgende Schritte angenommen:

- (lokale) Modellerstellung einschließlich Verifikation und Validierung (V&V),
- Integration des Modells in einen Gesamtkontext,
- V&V der Modelle im Integrationskontext,
- Modellnutzung (beispielsweise die Durchführung von Simulationsexperimenten) sowie

- Modellwartung, -pflege und -archivierung

Die V&V umfasst Maßnahmen zur Sicherstellung der Korrektheit und Gültigkeit eines Modells für das zu betrachtende System und die zu untersuchende Aufgabenstellung (vgl. Rabe et al. 2008).

Mit dem in der nachfolgenden Tabelle 5.1 dargestellten Ordnungsrahmen soll die Bandbreite der zu berücksichtigenden Maßnahmen aufgezeigt und ein Einblick in den Umfang der – je nach Anforderungsprofil des Unternehmens und konkreter IT-Werkzeuglandschaft – notwendigen Maßnahmen gegeben werden. Weitere Details sind beispielsweise in Jessen et al. (2000), Wenzel (2006), Bernhard und Wenzel (2006) sowie für die kolaborative Logistikplanung in Bernhard (2009) zu finden.

Tabelle 5.1 Ordnungsrahmen für Maßnahmen zur Schaffung von Modellinteroperabilität – Integrierte Modellbildung und -nutzung in der Planungsphase –

(lokale) Modellerstellung und V&V	Integration der Modelle	V&V	Modellnutzung (z. B. für Experimente)	Wartung, Pflege, Archivierung
a) technische Voraussetzungen zur Zusammenarbeit auf Zeichen- und Datenebene (syntaktische Interoperabilität)				
interne Modellkonsistenz	Kommunikationsfähigkeit; Schnittstellenstandards; Datenkonvertierung	Informations- und Zustandskonsistenz	Synchronisation von Modelldaten	strukturierte Langzeitarchivierung (LZA), Sicherstellung der Datenunversehrtheit
strukturierter Modellaufbau	Redundanzvermeidung/-verwaltung	Gewährleisten relationaler Integritäten	Änderungen z. B. bei lokaler Struktur-/Parametervariation	Zugriffs- und Datensicherheitsmechanismen
Zeitverwaltung (statisch, dynamisch, diskret, kontinuierlich, hybrid)	Festlegung der Integrationsart (temporale Bezugsebene: online/offline)	Konsistenz temporaler Beziehungen	strukturierte Datenablage und -verwaltung	Sicherstellen der Verfügbarkeit
Eindeutigkeit der Bedeutung integrationsrelevanter Daten	globales Zeitmanagement			strukturierte und vollständige Modelldokumentation
Sicherstellen der Skalierbarkeit des Modells	Zuverlässigkeit, Eindeutigkeit, Robustheit, Ausfallsicherheit			Sicherstellen von Modellwieder-/-weiterverwendung
Bereitstellen von Metadaten (Modelldokumentation)				
b) Sicherstellung der richtigen Information (Bedeutung der Daten) für die jeweils zu integrierende Anwendung (semantische Interoperabilität)				
Standardbibliotheken	Modellbeziehungen über Ontologien oder Mapping-mechanismen	Gültigkeit modellübergreifender logischer Zusammensetzung	Nutzung gemeinsamer Terminologien	Nutzung gemeinsamer Terminologien

Modellierungs- konventionen	standardisierte Kopplungsar- chitekturen	Gültigkeit von Wechselwir- kungen ver- schiedener De- taillierungsgra- de der Modelle	definierte und konsistente Ini- tialzustände	Konventionen zur Modellnut- zung, -wartung und -pflege
Realisierung von Referenz- strukturen und -modellen	Berücksichti- gung von zeitli- cher Varianz, Granularität und Betrachtungs- tiefe der Daten		Zeit- und Zu- standskonsis- tenz während der Nutzung	(teil-)automa- tischer Daten- und Modellab- gleich bei stan- dardisierten Koordinations- aufgaben
(teil-)automa- tische Modell- generierung	Nutzung über- geordneter Mo- dellierungspa- radigmen		Konventionen zur Modellnut- zung, -wartung und -pflege	(teil-)automa- tischer Daten- und Modellab- gleich bei stan- dardisierten Koordinations- aufgaben

c) Sicherstellung der richtigen Interpretation und Verwendung der Information seitens des Empfängers (pragmatische Interoperabilität)

Homogenisierung der Vorgehensweisen und Festlegung eines Prozessmodells zur Kollaboration der beteiligten Akteure

Vorgabe definierter Meilensteine (Überwachung der Modellerstellungs- und Nutzungsprozesse); organisatorische Integration der Aufgaben

Daten- und Modelltransparenz auf der Basis einer vollständigen und durchgängigen Dokumentation; Konfigurationsmanagement (Versions- und Releasemanagement)

Änderungsmanagement (einschließlich Löschen von Modellen) mit Beantragen, Durchführen, Propagieren und Dokumentieren von Modelländerungen

Qualitätsmanagement (Sicherstellung von Korrektheit und Gültigkeit; Verwendung von Prüf- und Freigabemechanismen)

Definition eines Rollenmodells mit Zugriffrechten, Restriktionen für Autorisierung, Vertraulichkeit, Authentifikation (Workflowmanagement)

5.3 Softwarewerkzeugklassen im Unternehmen

Die in Kapitel 4 dargestellten Methoden werden in unterschiedlichen Softwarewerkzeugen von der Entwicklung bis zur Produktion eingesetzt. Hierbei nutzen die jeweiligen Werkzeuge die Methoden in unterschiedlicher Ausprägung und Gewichtung. Auch weisen die einzelnen Werkzeuge branchenspezifische Unterschiede im Hinblick auf technische und funktionale Leistungsmerkmale auf. Im Folgenden werden die verschiedenen Werkzeuge zu Werkzeugklassen zusammengefasst und als solche kurz dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung einzelner Werkzeuge ist nicht Zielsetzung dieses Buches. Hier sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

5.3.1 Werkzeugklassen der Produkt- und Produktionsmittelentwicklung

Werkzeuge der Produkt- und Produktionsmittelentwicklung werden heute auch unter dem Begriff der virtuellen Produktentstehung zusammengefasst. Eigner und Stelzer (2009, S. 48) verstehen unter diesem Begriff die Anwendung aller Simulations-, Validierungs- und Verifikationstechniken auf der Basis digitaler realitätsnaher Modelle, um ein frühzeitiges Erkennen der Produkteigenschaften sowie eine Reduzierung von physischen Prototypen zu ermöglichen. Grundlagen der virtuellen Produktentwicklung ist ein sogenannter DMU Digital Mock Up (zur Definition vgl. Abschnitt 1.2.2).

Die in der virtuellen Produkt- und Produktionsmittelentwicklung eingesetzten Werkzeugklassen lassen sich im Wesentlichen unterteilen in

- Computerunterstützte Anwenderwerkzeuge wie CAx- und Office-Werkzeuge als Erzeuger- bzw. Autorensysteme,
- PDM-Systeme als Integrationsplattform oder auch Daten-Backbone für die zu integrierenden Anwenderwerkzeuge und
- Werkzeuge zur Digital Engineering Visualization (DEV – Digital Engineering Visualization).

Zu den *CAx-Systemen* zählen die CAD-Werkzeuge, die CAE-Werkzeuge und die CAM-Werkzeuge. *CAD-Werkzeuge* in der Produkt- und Produktionsmittelentwicklung dienen zur rechnergestützten Erzeugung der geometrischen, technologischen und funktionalen Daten eines Produktes oder Produktionsmittels in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase. Sie unterscheiden sich nach dem Fokus der Modellierung in *E-*

CAD-Systeme (Elektronik und Elektrotechnik: Erstellung elektrischer Konstruktionsunterlagen, z. B. Stromlauf- oder Beschaltungsplänen) und *M-CAD-Systeme* (mechanische Anlagenkonstruktion). Weitere *CAE-Werkzeuge* umfassen IT-Systeme zur computerunterstützten Berechnung, Simulation und Analyse. Im Produktentstehungsprozess werden vor allem FEM-, MKS- und CFD-Methoden eingesetzt. *CAM-Werkzeuge* unterstützen das computergestützte Fertigen und Montieren und umfassen Werkzeuge und Verfahren, die sich mit dem Steuern der entsprechenden Maschinen beispielsweise über NC-Programme beschäftigen (vgl. auch Abschnitt 5.3.4). Laut Eigner und Stelzer (2009) sind in Ergänzung zu den oben genannten klassischen Werkzeuge auch *CAS-Werkzeuge* (CAS – Computer Aided Styling) zu nennen. CAS-Werkzeuge dienen den Produktdesignern zum Ausgestalten des Produktes im Rahmen des Designprozesses.

Die ebenfalls als Erzeugersysteme in der Produkt- und Produktionsmittelentwicklung eingesetzten *Office-Produkte* (Excel, Word, PowerPoint) umfassen u. a. Tabellenkalkulationen zur Berechnung von quantitativen Größen aus umfassendem Datenmaterial, Textverarbeitungsprogramme zur Dokumentation, beispielsweise von Planungsergebnissen, sowie Präsentationsgrafiken zur Visualisierung von quantitativen und qualitativen Planungsergebnissen.

Um die verschiedenen Erzeugersysteme im Kontext der Produkt- und Produktionsmittelentstehung geeignet vernetzen zu können, muss eine IT-technische Infrastruktur bereitgestellt werden, über die die verschiedenen Informationen und Daten abgeglichen und verwaltet werden.

Product Data Management Systeme (PDM-Systeme) bezeichnen laut VDI 2219 (2016) technische Datenbank- und Kommunikationssysteme. Ihre Aufgabe ist, „Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse bzw. Lebenszyklen konsistent zu speichern, zu verwalten und transparent für alle relevanten Bereiche eines Unternehmens bereitzustellen.“ (VDI 2219 2016, S. 9).

Laut VDI 2219 (2016) unterscheiden PDM-Systeme zwischen Metadaten und der Verwaltung der Produktdaten. Metadaten beschreiben Zusatzinformationen zu den zu verwaltenden Dateien und enthalten beispielsweise Informationen über den Urheber/Autor der jeweiligen Datei, das Datum der Erstellung, die Versionsnummer oder auch den Freigabestatus. Die Dateien selber enthalten die produktrelevanten Daten wie technische Zeichnungen, CAD-Modelle, Stücklisten oder auch einfache Textdateien. Diese Dateien können in spezifischen Dateiarchiven entweder im Format des jeweils verwendeten Erzeugersystems oder in einem Austauschformat für

Produktdaten (z. B. IGES – Initial Graphics Exchange Specification, vgl. Abschnitt 5.4.3) abgelegt sein.

Weitere Ausführungen zur Architektur von PDM-Systemen sowie zur Einführungsplanung und zu den zugehörigen Projektmanagementphasen sind der VDI 2219 (2016) zu entnehmen.

Zur Darstellung der Produktdaten werden basierend auf den 2D-Zeichnungen und 3D-Modellen Visualisierungswerzeuge eingesetzt. Hier hat die bereits in Abschnitt 5.1.2 erwähnte Produktdatenstandardisierungsgruppe SASIG – aus der Produktkonstruktion mittels CAD begründet – den Begriff *Digital Engineering Visualization (DEV)* geprägt. Hierunter fallen die Werkzeuge zur Darstellung von Daten in Form von 2D- und 3D-Visualisierungen (sogenannte Viewer), aber auch VR-Systeme (zu den Methoden vgl. Abschnitt 4.8).

5.3.2 Werkzeugklassen in der Produktionsplanung

Für die Planung und Absicherung von Produktionssystemen kommen neben den bereits in Abschnitt 5.3.1 erwähnten klassischen Office-Werkzeugen folgende Werkzeugklassen zum Einsatz:

- CAP-Werkzeuge (CAP – Computer Aided Planning; rechnergestützte Arbeitsplanung) bzw. auch CAPP-Werkzeuge (CAPP – Computer Aided Process Planning)
- Computergestützte Layoutplanungswerzeuge (CALP – Computer Aided Layout Planning)
- CAE-Werkzeuge zur Prozess-, Struktur- und Funktionsanalyse
- Visualisierungswerzeuge

Die *computergestützte Arbeitsplanung (CAP)* bezeichnet nach AWF (1985) die EDV-Unterstützung der Arbeitsplanung. Unter Verwendung der Ergebnisse der Produktkonstruktion aus dem CAD-Werkzeug (Produktdaten) werden die einzelnen Arbeitsschritte zur Teilefertigung und Montage sowie die einzusetzenden Arbeitssysteme festgelegt. Zu den Aufgaben der Arbeitsplanung gehören die Planung der Arbeitsvorgänge und der Arbeitsgangfolgen, die Auswahl der Verfahren und Betriebsmittel zur Erzeugung der Objekte, die Vorgabezeitermittlung sowie die rechnergestützte Erstellung von Daten für die Steuerung der Betriebsmittel. Basierend auf einer Stückliste ist das Ergebnis der Arbeitsplanung ein Arbeitsplan, der für die Produktionsplanung und die Fertigung genutzt wird. Letztendlich ist das Ziel der CAP/CAPP-Systeme, unter Verwendung der Produktdaten die Ressourcen- und Prozessdaten zusammenzuführen, um Prozessparameter, wie z. B. Vorschub und Schnittgeschwindigkeit, festzulegen.

Computergestützte Layoutplanungswerkzeuge (CALP) dienen dem interaktiven Entwurf von Layoutstrukturen auf der Basis von 2D- und/oder 3D-Maß- und Geometriebibliotheken wie z. B. von Gebäuden, Arbeitsplätzen und Maschinen. Der Vorteil dieser Werkzeuge liegt in der Tatsache begründet, dass nicht nur die eigentliche Layouterstellung computergestützt erfolgt, sondern auch Planungsaufgaben, wie die Materialflussanalyse oder die Entwicklung von verbesserten Anordnungsstrukturen, in die Planungswerkzeuge integriert sind (vgl. auch Grundig 2015). Als Werkzeuge kommen CAD-Systeme oder auch teambasierte Planungswerkzeuge (vgl. Abschnitt 4.11.2) zum Einsatz.

CAE-Werkzeuge zur Prozess-, Struktur- und Funktionsanalyse in der Produktionsplanung werden vor allem zur computerbasierten statischen und dynamischen Analyse der Fertigungsverfahren, Produktionsprozesse und Fabrikstrukturen eingesetzt. Hierzu zählen Prozessmodellierungswerkzeuge (zur Methode der Prozessmodellierung vgl. Abschnitt 4.4.1), Dimensionierungs- und Berechnungswerkzeuge (z. B. auch Tabellenkalkulationsprogramme in der Regel als Bestandteile der Office-Werkzeuge), Optimierungswerkzeuge, Werkzeuge zur Arbeitsplatzgestaltung und Ergonomiesimulation, Simulationsinstrumente für Fertigungsprozesse, Robotersimulationswerkzeuge sowie Simulationswerkzeuge zur Untersuchung von Materialflüssen und Produktionsabläufen (bezüglich der jeweiligen Methoden sei auf die Abschnitte 4.5 und 4.6 verwiesen).

Zur Präsentation und Diskussion der Analyseergebnisse werden – wie auch in der Produkt- und Produktionsmittelplanung – die CAE-Werkzeuge in der Produktionsplanung durch geeignete (oftmals in das CAE-Werkzeug integrierte) *Visualisierungswerkzeuge* ergänzt. Typischerweise werden in der Produktionsplanung reine Viewer zur Darstellung von 2D- und 3D-Visualisierungen, 3D-Animationswerkzeuge und VR-Systeme eingesetzt (zu den Methoden vgl. Abschnitt 4.8). Allerdings finden auch einfache Präsentationsprogramme zur Visualisierung von quantitativen und qualitativen Planungsergebnissen Anwendung. Als Präsentationsgrafiken kommen die in Abschnitt 4.8.1 behandelten statischen Visualisierungsmethoden zum Einsatz.

5.3.3 Werkzeugklassen zum Einsatz im Fabrikbetrieb

In Ergänzung zu den bereits erwähnten CAD- und CAM-Werkzeugen werden im Fabrikbetrieb weitere IT-Werkzeuge eingesetzt, die den ordnungsgemäßen Fabrikbetrieb sicherstellen sollen:

- PPS-Systeme/ERP-Systeme (ERP – Enterprise Resource Planning)

- BDE- und MDE-Systeme
- MES-Systeme (MES – Manufacturing Execution Systems)
- CAFM-Software (CAFM – Computer Aided Facility Management)

Laut VDI 4499 Blatt 2 (2011) umfassen *PPS-Systeme* primär betriebswirtschaftlich orientierte Funktionen sowie technische Funktionen zur Materialwirtschaft, Zeitwirtschaft und Fertigungssteuerung. Sie beinhalten ebenfalls die dabei anfallende Verarbeitung der Stammdaten aus Stücklisten, Arbeitsplänen und auftragsbezogenen Informationen und dienen der operativen Planung und Steuerung der Fabrik. Nach Hackstein (1989) sind als Aufgaben eines PPS-Systems zum einen die *Produktionsplanungsaufgaben* Produktionsprogramm-, Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanung, zum anderen die *Produktionssteuerungsaufgaben* Auftragsfreigabe und Auftragsvergabe zu nennen. Ergänzt werden diese sogenannten Hauptfunktionen um eine Datenverwaltung zur Stammdatensammlung und -speicherung (auftragsneutral und auftragsabhängig) und zum Führen von Verwendungsnachweisen. Die Datenverwaltung umfasst üblicherweise die Stammdaten, die Erzeugnisstrukturdaten (Stücklisten), Arbeitspläne und Betriebsmitteldaten (zur Begrifflichkeit der unterschiedlichen Grunddaten vgl. beispielsweise Wiendahl 2010).

Während die Produktionsprogrammplanung eine strategisch langfristige Aufgabe darstellt, beziehen sich die Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanung auf einen mittelfristigen und die Aufgaben der Produktionssteuerung auf einen kurzfristigen Zeithorizont. In Weiterentwicklung zu der bei Hackstein (1989) angenommenen sukzessiven Abarbeitung der einzelnen Aufgaben sieht das *Aachener PPS-Modell* (Hornung et al. 1995) eine eher modulare Aufgabenstruktur vor und geht von dem Leitgedanken aus, dass jeder Bereich ein Lieferant für einen abnehmenden Bereich darstellt. Die Funktionen im Aachener PPS-Modell (Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Fremdbezugsplanung und -steuerung, Eigenfertigungsplanung und -steuerung), entsprechen der Grundfunktionalität nach Hackstein (1989). Ergänzt werden diese Funktionen um eine Datenverwaltung sowie um die Auftragskoordination, das Lagerwesen und das PPS-Controlling als Querschnittsfunktionen. Eine Erweiterung stellen sogenannte Netzwerkaufgaben (Netzwerkkonfiguration, Netzwerkabsatzplanung, Netzwerkbedarfsplanung) dar, die den überbetrieblichen Aspekt auf strategischer Ebene abdecken (vgl. Schuh et al. 2012). Das Pendant der PPS-Systeme stellen für Handelsunternehmen Warenwirtschaftssysteme (WWS - Warenwirtschaftssystem) dar.

In Erweiterung der PPS-Systeme ergänzen heute ERP-Systeme (Enterprise Resource) die klassischen PPS-Aufgaben um Funktionen zur Planung

personeller und finanzieller Ressourcen, zum Personalwesen, zur Logistik und zum Warehouse Management, zum Customer Relationship Management (CRM) und zum E-Business. *ERP-Systeme* kennzeichnen im Prinzip einen übergeordneten „Sammelbegriff für Informationssysteme, die Unternehmensressourcen planen und verwalten.“ VDI 4499 Blatt 2 (2011, S. 48). Sie müssen für das jeweilige Unternehmen, in dem sie eingesetzt werden sollen, geeignet adaptiert, parametrisiert und hinsichtlich ihrer Funktionalität skaliert werden.

Für die Auftragsfortschrittskontrolle ist eine Rückmeldung an das ERP-System aus dem realen Betrieb notwendig. An dieser Stelle greifen spezielle *Betriebs- und Maschinendatenerfassungssysteme* (BDE/MDE), die zur Erfassung von Maschinendaten, Fertigungsauftragsdaten, Lagerbestandsdaten oder auch Personaldaten dienen (vgl. auch Abschnitt 4.3.2).

Während ERP-Systeme Funktionen für die *Unternehmensleitebene* zur Verfügung stellen, sind MES Manufacturing Execution Systems (auch Fertigungsleitsysteme, Produktionsleitsysteme) auf der *Fertigungsleitebene* einzuordnen. MES bezeichnen Fertigungsmanagementsysteme (VDI 5600 Blatt 1 2016), die im Wesentlichen die Aufgaben Feinplanung und -steuerung, Informationsmanagement, Qualitäts-, Personal-, Betriebsmittel-, Material- und Energiemanagement, Leistungsanalyse und Datenerfassung unterstützen.

Der Unterschied zwischen MES und ERP liegt in der hierarchischen Zuordnung im Unternehmen (Unternehmensleitebene versus Fertigungsleitebene) und in der zeitlichen und operativen Detailliertheit der Betrachtung von Aufträgen, Ressourcen und Material. Während beispielsweise ein ERP-System Art und Menge der Aufträge für einen Zeitraum bestimmt, definiert ein MES die Bearbeitungszeitpunkte, die Zuordnung zu den Ressourcen und die Auftragsabwicklungsreihenfolge. Die Ressourcen werden im ERP nach kaufmännischen Gesichtspunkten, im MES nach Verfügbarkeiten und Zuständen verwaltet. Für das Material löst ein ERP-System Bestellvorgänge aus; ein MES legt die Materialverwendung fest und organisiert die Bereitstellung des Materials. Eine umfassende Beschreibung der MES-Aufgaben ist der VDI 5600 Blatt 1 (2016) zu entnehmen.

Eine weitere IT-Werkzeugklasse im Fabrikbetrieb lässt sich unter dem Begriff *CAFM-Software* zusammenfassen. Diese dient der computerbasierten Planung, Verwaltung, Analyse und Verbesserung aller kostenrelevanten Betriebs- und Bewirtschaftungsvorgänge rund um die baulichen und technischen Anlagen. Sie umfasst neben der Verwaltung der reinen Bestandsdaten in der Regel auch die Verwaltung der Prozessdaten zur koordinierten Durchführung und zur Auftragsverfolgung (vgl. beispielsweise Nävy 2006).

5.3.4 Steuerungssoftware zur Automatisierung von Produktionsanlagen

Die computerbasierte Steuerung von Maschinen (CAM) ist der in Abschnitt 5.3.3 aufgeführten Fertigungsleitebene untergeordnet. Sie liegt auf der Prozessleitebene und umfasst alle Aufgaben zur Automatisierung der Fertigung unter Verwendung von Steuerungssoftware. Diese unterscheidet nach Art des zu steuernden Systems wie beispielsweise Roboter, Werkzeugmaschinen, Handhabungssysteme oder auch Lager- und Transportsysteme. Sie erzeugt Anweisungen für Werkzeug- und Werkstückbewegungen, Bearbeitungs- oder Bewegungsgeschwindigkeiten und Werkzeugwechsel (vgl. beispielsweise auch Weck und Brecher 2006).

Eine detaillierte Darstellung der unterschiedlichen Programmiersysteme würde an dieser Stelle zu weit führen. Für Roboterprogrammiersysteme sei z. B. auf die DIN EN ISO 10218 (2012), für Programmiersysteme zur numerischen Maschinensteuerung beispielsweise auf die DIN 66025-1 (1983) und -2 (1988) sowie auf die DIN 66215-1 (1974) und -2 (1982) verwiesen. Neben einer manuellen Erstellung eines NC-Programms nach DIN 66025 kann auch eine computergestützte Programmerstellung erfolgen. In diesem Fall unterstützen spezielle Programmiersprachen oder auch grafisch-interaktive Symbole die Beschreibung der Werkstückbearbeitung, so dass bis zu einem gewissen Grad eine automatische Ermittlung der durchzuführenden Bearbeitungsschritte erfolgen kann.

Die Programmierung industrieller Automatisierungssysteme und damit auch klassischer speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) ist in der IEC 61131 genormt, so dass Programmierungen hersteller- und weitestgehend auch hardwareunabhängig durchgeführt werden können (vgl. auch John und Tiegelkamp 2009 oder Seitz 2015).

5.3.5 Softwarewerkzeugklassen für übergreifende Querschnittsaufgaben

In Ergänzung zu den in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.4 beschriebenen Werkzeugklassen werden im Rahmen der DF weitere Werkzeugklassen eingesetzt, die allerdings aufgrund ihrer Funktionalitäten nicht einem speziellen Anwendungsbereich zuzuordnen sind, sondern eher übergreifende Querschnittsaufgaben erfüllen. Hierzu zählen beispielsweise:

- CAQ-Werkzeuge (CAQ – Computer Aided Quality Assurance)
- Projektmanagementsysteme
- Dokumentenmanagementsysteme
- Workflowmanagementsysteme

Der Begriff CAQ beschreibt die *rechnergestützte Qualitätssicherung* als Bestandteil des Qualitätsmanagements eines Unternehmens (vgl. z. B. Pfeifer und Schmitt 2014). Werkzeuge zur Qualitätssicherung werden sowohl bei der Produktentwicklung als auch bei der Produktionsplanung und im Fabrikbetrieb eingesetzt. Ziel ist die Erreichung einer hohen Prozess- und Produktqualität und die präventive Fehlervermeidung. Die Aufgaben der CAQ-Werkzeuge umfassen die Analyse, Dokumentation und Archivierung der jeweils qualitätsrelevanten Daten. Zu den Verfahren des Qualitätsmanagements zählen beispielsweise Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen, die statistische Prozesslenkung zur Überprüfung der Stabilität und Reproduzierbarkeit von Produktionsprozessen, die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) oder auch die statistische Versuchsplanung. Fragen der virtuellen Qualitätssicherung beziehen sich auf die virtuelle Produkt- und Fertigungsabsicherung oder die Erstellung von Steuerungssoftware.

Projektmanagementsysteme unterstützen die in Abschnitt 4.9 geforderte zielorientierte Zusammenarbeit in personen- und sachbezogener Hinsicht innerhalb eines Projektes. Laut DIN 69901-1 (2009) haben Projektmanagementsysteme als Ziel die Schaffung von Transparenz in der Projektstruktur, die Sicherstellung der Kommunikation zwischen den Projektbeteiligen, die Festlegung eindeutiger Phasen der Projektabwicklung sowie der jeweiligen fachlichen und personellen Anforderungen zur Projektabwicklung. Darüber hinaus schaffen sie die Voraussetzung für eine systematische Projektüberwachung und stellen die Qualität der Projektmanagementprozesse sicher. Weiterhin erlauben Projektmanagementsysteme auch eine Rückverfolgbarkeit der wesentlichen Projektschritte, ein Risikomanagement sowie eine Anpassung an möglicherweise notwendige Änderungen in der Projektdurchführung.

Dokumentenmanagementsysteme (zum Thema Dokumentenmanagement vgl. DIN EN 82045-1 2002; DIN EN 82045-2 2005) bezeichnen IT-Werkzeuge zur Verwaltung und Archivierung von Dokumenten. Hierbei kann es sich um beliebige Dokumente wie Zeichnungen oder Ablaufpläne, Stücklisten, Produktinformationen, Softwaredokumentationen oder auch 2D- und 3D-Modelle, Berechnungs- und Simulationsergebnisse oder erstellte Programme handeln. Ergänzende Metainformationen zur eindeutigen Identifikation und Beschreibung (z. B. Dokumentennummer, Art des Dokumentes; Versionsnummer, Autor) oder auch zur organisatorischen Abwicklung (Erstellungsdatum, Änderungsvermerke, Freigabestatus) unterstützen die Verwaltung der Dokumente. Dokumentenmanagementsysteme haben nicht die Verteilung der Dokumente zum Ziel. Hier greifen *Workflowmanagementsysteme*, die sicherstellen, dass Daten und Doku-

mente im Rahmen der jeweiligen Geschäftsprozesse rollen- und aufgaben-spezifisch verwendet werden können (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.9.3).

5.4 Datenaustauschformate

Softwarewerkzeuge nutzen zur Speicherung und zum Austausch ihrer Daten in der Regel Dateien mit spezifischen Datenformaten, die jeweils eigene Dateierweiterungen zur Folge haben. Die Bandbreite der Datenformate reicht von einfachen Datenformaten eines Herstellers bis zu neutralen, standardisierten Formaten. In Abhängigkeit von der Neutralität und Standardisierung eines Formates kann der Datenaustausch zwischen einem oder mehreren Softwarewerkzeugen auf folgenden Wegen erfolgen: a) die Ausgabedaten eines Werkzeugs werden *direkt* in das native Zielformat (d. h. das primär verwendete Dateiformat des Zielsystems) konvertiert; b) es wird ein neutrales, ggf. standardisiertes Austauschformat verwendet, in das die Werkzeuge die auszutauschenden Daten konvertieren bzw. aus dem heraus die eigenen Formate generiert werden müssen. Bei der *Konvertierung* werden die Daten in einem Austauschformat so gespeichert (Datenexport), dass diese Daten von einem anderen Softwarewerkzeug eingelesen (Datenimport) werden können. Hierbei müssen Syntax und Semantik der auszutauschenden Daten überprüft und ggf. adaptiert und möglicherweise Datenverluste in Kauf genommen werden.

Bei dem Austausch der Daten zwischen zwei Softwarewerkzeugen kann ein Ziel auch die bewusste Verringerung der Datenkomplexität sein. Komplexitätsreduktion (vgl. auch Wenzel und Bernhard 2008) kann durch *Dimensionsreduktion* (Verringerung der Dimension eines Variablenvektors durch Entfernen einzelner Variablen aus dem Vektor oder durch Zusammenfassung mehrerer Variablen) sowie durch *Datenreduktion* (d. h. Eliminieren von Daten, die keine für die Aufgabenstellung relevanten Information enthalten) erfolgen. Geometriedaten (vgl. beispielsweise VDI 3633 Blatt 11 2009) können z. B. durch *Tesselierung*, d. h. durch eine grobe Auflösung von Flächen in Dreiecke, oder durch das Löschen nicht relevanter Geometrien (z. B. das Innenleben eines geschlossenen Körpers) vereinfacht werden. Beispielsweise kann die Reduktion von Konstruktionsdaten die Reduzierung der Geometrie auf eine geschlossene Außenhülle, die Entfernung überflüssiger Objekte wie Schrauben oder anderer Kleinteile oder das Entfernen geometrischer Details der Außenhülle wie geglättete Krümmungsverläufe beinhalten (siehe Abb. 5.4). Konvertierungs- und Reduktionsalgorithmen bedingen damit zumeist auch eine Änderung der Datenstrukturen und -inhalte. Die Konvertierung von Volumenmodellen in

Flächendarstellungen, die Tesselierung oder auch unterschiedliche Interpretationen von Flächenorientierungen in grafischen Modellen können dazu führen, dass sich die Qualität der auszutauschenden Daten ändert und eine entsprechende Nacharbeit notwendig wird.

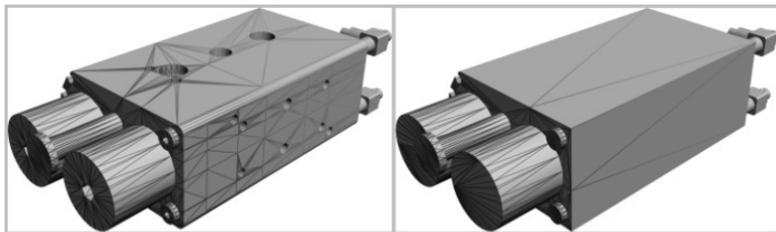


Abb. 5.4 CAD-Modell einer Konstruktion (links) und datenreduziertes Modell (rechts) (Quelle: NetAllied Systems GmbH, Ravensburg)

Darüber hinaus erlauben spezielle *Kompressionsalgorithmen* die Reduktion der Größe einer Datei (in Byte) ohne wesentlichen Informationsverlust. Die Algorithmen werden nach den zu komprimierenden Daten wie Texte, Bilder (z. B. JPEG oder GIF), Filme (z. B. MPEG) und Musik (z. B. das MP3-Verfahren) und nach verlustbehafteten und verlustlosen Algorithmen (vgl. Herold et al. 2012, S. 750) unterschieden. Die Anwendung verlustbehafteter Kompressionsalgorithmen ist möglich, wenn beispielsweise bei Bildern nicht mehr die Informationen zum Aufbau der Geometrien, sondern nur das erstellte Endprodukt (Standbild) relevant ist. Eigner und Stelzer (2009, S. 233) vergleichen verschiedene Geometriiformate für den Einsatz im Bereich DMU u. a. hinsichtlich der Aspekte Kompressionsrate, Exaktheit der Geometrie und offener Standard und sehen JT (Jupiter Tesselation, vgl. auch Abschnitt 5.4.2) als das Format, das eine weitgehend exakte Geometriedarstellung bei hoher Kompressionsrate ermöglicht.

Zum Austausch von Daten zwischen verschiedenen Anwendungsprogrammen stehen unterschiedliche Datenaustauschformate zur Verfügung, die sich beispielsweise nach der Art der zu speichernden Daten sowie nach technischen Kriterien wie Kompressionsgrad bzw. Redundanzfreiheit, Speichervolumen, Kompatibilität oder Performance klassifizieren lassen. Für die Nutzung der Formate in den Unternehmen sind Entwicklungsphilosophie und Standardisierungsbestrebungen der Formate von entscheidender Bedeutung. So werden beispielsweise für die Fabrikplanung in der Automobilindustrie je nach verwendeten Planungssystemen in den Bereichen Fabriklayout, Anlagenkonstruktion, Materialfluss- und Zellsimulation zum Austausch von 3D-Daten sehr unterschiedliche Formate genutzt. Der VDA hat in den Jahren 2006 bis 2008 hierzu eine Bestandsaufnahme bei

den Firmen AUDI, BMW, Daimler, Opel und VW gemacht und die Ergebnisse der Umfragen in der VDA (2009a) zusammengestellt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Klassen der Datenaustauschformate kurz erläutert; auf spezifische Einzelformate wird nur beispielhaft eingegangen.

Nicht Bestandteil der folgenden Darstellungen sind spezifische *Nachrichtenformate* zum elektronischen Datenaustausch (EDI – Electronic Data Interchange) zwischen verschiedenen Unternehmen (vgl. beispielsweise Zimmermann 2007). Derartige Formate wie das in der Automobilbranche eingesetzte Odette File Transfer Protocol (OFTP) (Odette-Standard ODG11ED9206; ODETTE – Organisation for Data Exchange by Tele Transmission in Europe) oder das auf diesem basierende ENGDAT-Format (Engineering Data Message, vgl. VDA 4951 Part 1-3 2009) enthalten neben den auszutauschenden Daten auch Informationen über Sender, Empfänger, Projekt- oder Versionsstand.

5.4.1 Proprietäre herstellerspezifische Formate

Proprietäre oder auch sogenannte „native“ Datenformate beschreiben von einem Hersteller für ein bestimmtes Softwarewerkzeug definierte Formate. Diese dienen dazu, die Daten in einer für dieses Softwarewerkzeug bestmöglichen Art und Weise abzulegen.

Proprietäre Formate sind stets mit Rechten verbunden. Der Hersteller, der das Format entwickelt, hält jegliche Urheberrechte daran, so dass andere Hersteller, die dieses Format (z. B. in Import- und Export-Filters) anbieten wollen, auf Lizenzabkommen angewiesen sind. Aufgrund der anfallenden Lizenzkosten werden proprietäre Formate nur in sehr seltenen Fällen in freier Software eingesetzt und aus diesen Gründen auch nicht offengelegt, d. h. andere Softwarehersteller sind auf Informationen des Rechtseinhabers angewiesen. Dieser hat hingegen die Möglichkeit, das Format abzuändern oder anzupassen, und ist nicht verpflichtet, diese Änderungen mitzuteilen oder offen zu legen (vgl. Reiter 2004a; Krechmer 2006).

Als typische Beispiele für proprietäre Formate lassen sich die gängigen Microsoft Office Formate (bis Office 2003) nennen: Die Formate .DOC (Word), .XLS (Excel) oder .PPT (Powerpoint) sind von Microsoft speziell für die einzelnen Anwendungen entwickelt worden. Im Laufe der Jahre haben sie vielfach Änderungen erfahren, die teilweise sogar zu Inkompatibilitäten zwischen verschiedenen Office-Versionen führten. Seit Office 2007 basieren die Formate auf XML (eXtensible Markup Language, vgl. auch Abschnitt 5.5) und verwenden zusätzlich eine Datenkomprimierung.

Zudem hat Microsoft im Februar 2008 eine Dokumentation über alle Datenformate vor Office 2007 veröffentlicht.

Bei derartigen proprietären, offengelegten Formaten bleibt ein bestimmter Hersteller Eigentümer des Formates, stellt aber die Dokumentation des Formates zur Verfügung, so dass andere Anbieter dieses Format ebenfalls in ihren Werkzeugen unterstützen können. Beispiele für proprietäre, offengelegte Formate sind ebenfalls das Geometriedatenformat DXF (Drawing Interchange Format, vgl. auch Autodesk (2011) oder das 3D-Dateiformat FBX (FilmBoX, vgl. auch Autodesk 2016c). Auch das Simulationsbeschreibungsformat SDX (Simulation Data Exchange, vgl. beispielsweise Sly und Moorthy 2001) kann dieser Gruppe zugeordnet werden. Das Format wurde ursprünglich als neutrales allgemeingültiges Datenformat zur Generierung von ereignisdiskreten Simulationsmodellen und 3D-Animationen direkt aus CAD-Systemen entwickelt.

5.4.2 De-facto-Standards

Die Bedeutung von sogenannten De-facto-Standards wird in erster Linie durch deren Marktanteil (z. B. Verkaufszahlen der dieses Format nutzenden Produkte am Markt) bestimmt. De-facto-Standards können sich somit in den beiden genannten Gruppen der proprietären Formate herausbilden und ggf. den Status eines standardisierten Formates erreichen. So wird beispielsweise das bereits erwähnte Geometriedatenformat DXF in der Industrie als De-facto-Standard im CAD-Bereich bezeichnet.

Im Bereich der 3D-Grafik hat sich das Format Wavefront Object (.OBJ) zu einem De-facto-Standard etabliert (Wavefront 2016). Dieses Grafikformat, das ursprünglich von WaveFront Technologies für die Animationssoftware „Advanced Visualizer“ definiert wurde, hat sich zu einem allgemein akzeptierten Austauschformat für 3D-Geometrien entwickelt. Eine zusammenhängende Nutzung von Softwareprodukten, die alle das OBJ-Format unterstützen, kann an dem Zusammenspiel der Werkzeuge Poser (2016), 3D-Studio Max (Autodesk 2016a) und MotionBuilder (Autodesk 2016b) verdeutlicht werden: Mit Poser können sehr detaillierte und auf realen Fotos basierende 3D-Charaktere erstellt werden. Nach einem Export im OBJ-Format lassen sich diese in 3D-Studio Max weiterverarbeiten, um schließlich in MotionBuilder animiert oder durch Motion Capturing bewegt zu werden. Obwohl alle drei Softwareprodukte ihr eigenes Datenformat haben, lässt sich das OBJ-Format für den Datenaustausch zwischen diesen drei Werkzeugen nutzen.

Ein Visualisierungsformat, das in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat, ist das 3D-Datenformat JT zur Darstellung großer

CAD-Dokumente etwa für die Produktvisualisierung oder die Unterstützung eines Fertigungsprozesses. Für Mitglieder der jt-open-Initiative als Interessengemeinschaft von Endanwendern, Softwareherstellern und Hochschulen zur Förderung der JT-Technologie ist die Formatspezifikation offengelegt (www.jtopen.com). Die Verwendung des JT-Formats als Austauschformat in der Automobilindustrie ist beispielsweise dem VDA-Dokument zum 3D-Datenaustausch in der Fabrikplanung (VDA 2009a) zu entnehmen. Im Jahr 2009 haben der PLM-AK des VDA (vgl. auch VDA 2009b) und der ProSTEP iViP Verein eine gemeinsame Projektgruppe gegründet, die untersucht, in welchen Prozessen das Datenformat JT statt nativer CAD-Daten wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden kann.

5.4.3 Neutrale, nicht standardisierte Datenformate

Neutrale, d. h. herstellerunabhängige, nicht standardisierte Datenformate zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht von einem Hersteller für ein spezifisches Produkt entwickelt wurden, sondern von mehreren Herstellern und Produkten als Austauschformate genutzt werden. Häufig wurden diese Formate in Zusammenarbeit mehrerer Hersteller entwickelt, haben aber eine endgültige Standardisierung bei DIN oder IEEE nicht erreichen können. Ein für die DF wichtiges herstellerunabhängiges, nicht standardisiertes Dateiformat ist *IGES* zum digitalen Austausch von Informationen zwischen CAD-Programmen.

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) ist ein systemneutrales Zwischenformat, das so aufgebaut ist, dass eine Anwendung die Daten aus ihrem internen Format in IGES speichern und eine beliebige andere CAD-Anwendung die Daten lesen und in ihr eigenes Format konvertieren kann. Die jeweiligen Programme müssen lediglich einen sogenannten IGES-Konverter besitzen, um den Datenaustausch zu ermöglichen. In seiner Basisversion ist das IGES-Format ein ASCII-Format (ASCII – American Standard Code for Information Interchange), so dass sehr große Dateien entstehen können. Zudem ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit beim Einlesen vergleichsweise niedrig, was an der internen Verarbeitungsweise liegt. Des Weiteren unterscheiden sich die einzelnen CAD-Werkzeuge in Art und Umfang der Elemente, die sie unterstützen, so dass eine vollständige Portierbarkeit nicht gewährleistet werden kann. Im Jahr 1980 wurde IGES in Version 1.0 entworfen; 1996 wurde IGES 5.3 ein ANSI-Standard. Im Jahr 2006 wurde IGES dann von STEP (vgl. Abschnitt 5.4.4) abgelöst (vgl. National Institute of Standards and Technology 2016; Nävy 2006).

5.4.4 Neutrale standardisierte Datenaustauschformate

Neutrale standardisierte Formate sind frei verfügbare Standards, die von jedem Anwender implementiert werden können, ohne Lizenzabkommen treffen zu müssen. Die Formatspezifikationen sind in nationalen oder internationalen Normen festgeschrieben; der Eigentümer der Formatspezifikation ist ein Standardisierungsgremium. Die Formate sind gut dokumentiert und universell gehalten, um einen breiten Einsatzzweck zu ermöglichen. Entscheidungen über Änderungen und Weiterentwicklungen werden nachvollziehbar dokumentiert, um eine zügige Implementierung zu ermöglichen. Da keine Lizenzkosten anfallen, sind diese Formate auch häufig in Open-Source-Werkzeugen zu finden und bieten sich als Austauschformate an. Allerdings bleibt auch bei standardisierten Schnittstellen immer ein Interpretationsspielraum in Bezug auf die Formatverwendung, so dass dies im Einzelfall zu Problemen führen kann. Auch schwankt die Qualität der in den jeweiligen Anwendungsprogrammen implementierten Schnittstellen.

Im Folgenden werden drei standardisierte Datenaustauschformate vorgestellt.

STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) ist ein internationaler Standard, der zur Beschreibung von physikalischen und funktionalen Merkmalen von Produktdaten dient. Er ist darauf ausgelegt, den gesamten Produktlebenszyklus darstellen zu können, so dass er über verschiedene Systeme hinweg eingesetzt werden kann. Die formale Definition von STEP ist in der ISO 10303 (2012), aufgestellt von der ISO TC184/SC4, zu finden. Um STEP in verschiedenen Anwendungsbereichen einzusetzen zu können, gibt es sogenannte Applikationsprotokolle, die für bestimmte Anwendungsbereiche wie z. B. für Designprozesse im Automotive-Bereich spezialisierte Schnittstellen bereitstellen.

VRML (VRML – Virtual Reality Modeling Language) ist eine Beschreibungssprache für 3D-Modelle und -Szenen. Ursprünglich wurde VRML als 3D-Standard für das Internet entwickelt und ist, da die Daten im reinen Textformat in Dateien (.wrl) gespeichert werden, direkt lesbar. Durch die Speicherung in einem reinen Textformat können VRML-Dateien zudem von serverseitigen Skriptsprachen wie PHP und Perl generiert werden. Das Format bietet umfassende Möglichkeiten zur Beschreibung von Geometrien, Oberflächenbeschreibungen, Lichtquellen, Level of Detail und Animationen, so dass 3D-Modelle und animierte Szenen erstellt werden können. Aus den Geometrieinformationen und den zusätzlichen Daten erzeugt ein VRML-Viewer die Ansicht einer 3D-Szene. Da jedes angezeigte Bild neu berechnet (gerendert) wird, bestehen entsprechend hohe Hardwareanforderungen an den Prozessor oder die

Grafikkarte bei der Nutzung von VRML-Szenen. Die Version 1.0 von VRML wurde 1995 eingeführt und war eine Erweiterung des damals von Silicon Graphics (SGI) genutzten Inventor-Dateiformats. VRML 2.0 wurde 1997 spezifiziert und als VRML97-ISO/IEC 14772-Standard festgeschrieben (vgl. Web3D-Konsortium 2016). Als Nachfolger des VRML-Standards wurde die auf XML (vgl. Abschnitt 5.5.1) basierende Beschreibungssprache X3D (Extensible 3D) entwickelt, die als offizieller ISO/IEC-Standard für 3D-Inhalte im Internet vom WEB 3D Konsortium (vgl. <http://www.web3d.org>) verabschiedet wurde. Details zu VRML sind auch in der ISO/IEC 14772-2 (2004) und als Teil von X3D in der ISO/IEC 19776-2 (2015) zu finden.

Im Bereich BIM (Building Information Modeling) (vgl. auch Abschnitt 7.1.1) stehen die *IFC-Spezifikation* (IFC – Industry Foundation Classes; vgl. ISO 16739 2013) als Standard zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen zur Verfügung. Das offene, gut dokumentierte Datenformat unterstützt die Beschreibung und den Austausch von Informationen über Gebäudemodelle und Gebäudemanagement. Die Akzeptanz der IFC-Spezifikation ist vergleichsweise groß, sie wird von einer Vielzahl von Toolherstellern unterstützt. Im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) regelt die VDI 3805 (div.) den Produktdatenaustausch.

5.4.5 Branchenspezifische Entwicklungen

In den vergangenen Jahren wurden zur Nutzung der verschiedenen Modellierungswerzeuge oftmals Modellierungs- und Gestaltungsrichtlinien entwickelt, so dass die Freiräume der Datenformate branchen- und unternehmensspezifisch spezifiziert und eingeschränkt wurden. Darüber hinaus entstanden branchenspezifische Lösungen, die sich unterschiedlich stark am Markt etablierten.

VDAIS (Verband der Automobilindustrie – IGES Subset) bezeichnet verschiedene Untermengen des IGES-Standards mit dem Ziel der einfacheren Implementierung (VDMA/VDA 1994). Die Änderungen von VDAIS sind jedoch im Jahr 1991 in IGES 5.1 und in VDAFS (Verband der Automobilindustrie-Flächenschnittstelle) aufgegangen, so dass VDAIS nicht weiter gepflegt wird. *VDAFS* wurde entwickelt, um Freiformflächen z. B. für Karosserien von Fahrzeugen zu beschreiben, die auf analytischem Weg nicht exakt definiert werden können. Das Format VDAFS unterstützt im Gegensatz zu IGES nur dreidimensionale Informationen und kann nicht für zweidimensionale Zeichnungen verwendet werden. Diese Einschränkung und die daraus resultierenden Vereinfachungen machen eine Implementierung daher einfacher. In der VDI 3404 (2009) wird ebenfalls auf

VDAFS als CAD-Schnittstellenstandard hingewiesen, der primär zum Austausch von Karosseriedaten und hier besonders zum Austausch von Freiformflächen geeignet ist, die mit flächenorientierter 3D-Software erstellt sind. Volumenmodelle können allerdings nicht über dieses Format ausgetauscht werden. Obwohl VDAFS in der Praxis noch Relevanz hat, liegt zurzeit keine offizielle Publikation des Standards vor. Die DIN 66301 aus dem Jahr 1986, in der der Geometriedatenaustausch über VDAFS beschrieben war, wurde ohne Nachfolger zurückgezogen.

Basierend auf den STEP-Konventionen des Jahres 1988 entstand das Format *VDABS* (Verband der Automobilindustrie-Betriebsstätten), das sich speziell mit dem CAD-Datenaustausch in der Betriebsstättenplanung im Rahmen der Fabrikplanung befasst. Zu dem Zeitpunkt nicht in STEP enthaltene Elemente, wie Bemaßung, Beschriftung, Schraffuren und Strukturelemente, wurden in Anlehnung an die STEP-Methodik zusätzlich entwickelt. Der VDA hat hierzu im Mai 1993 die VDA-Empfehlung 4960 des VDA-Arbeitskreises „CAD/CAM“ herausgegeben (VDA 4960 1993). *STEP-CDS* (CDS – Construction Drawing Subset) ist ein Format für den Austausch von 2D-CAD-Daten bei der Planung von Betriebsstätten. Die VDA 4963 (2006) gibt Empfehlungen für die Implementierung durch Systemanbieter auf der Basis eines EXPRESS-Datenmodells.

Als Kernsoftwaresystem im Fabriklayout werden bei den in Deutschland planenden Automobilherstellern MicroStation oder AutoCAD verwendet. Für branchenspezifische Anforderungen wie Architektur, Stahlbau, technische Gebäudeausrüstung und Fördertechnik stehen die entsprechenden Zusatzmodule auf MicroStation- bzw. AutoCAD- Basis in Form von parametrischen 3D Bibliotheksobjekten zur Verfügung.

Da die Datenintegrität beim Datenaustausch innerhalb des Fabriklayouts höchste Priorität hat, wird seitens der Automobilhersteller von allen am Planungsprozess Beteiligten verlangt, die oben genannten Kernsysteme mit den branchenspezifischen Erweiterungen inklusive deren Standardisierung zu übernehmen. Inwieweit ein Datenaustausch mit Hilfe von neutralen Schnittstellen über entsprechende Konverter ohne Datenverlust umgesetzt werden kann, werden die aktuellen Entwicklungen im Kontext Industrie 4.0 zur vertikalen und horizontalen Integration zeigen.

5.5 Metasprachen zum Datenaustausch

Eine Metasprache ist definiert als eine „Sprache über eine Sprache“ (Ulrich 2002, s. v. Metasprache).

Bei einer *Metasprache* handelt sich um eine Sprache, die beschreibt und erklärt, wie eine andere Sprache zu verstehen ist.

Für den Datenaustausch ist eine Metasprache eine Sprache, die festlegt, wie die auszutauschenden Daten strukturiert und zu verarbeiten sind.

Daher lassen sich Metasprachen gut nutzen, um eigene Austauschformate zu definieren, die in dieser Metasprache beschrieben werden. Die Sprache, in der die eigentlichen Daten gespeichert sind und die mittels der Metasprache beschrieben ist, nennt man Objektsprache.

5.5.1 Die Metasprache XML

Mittels der Metasprache *XML* (eXtensible Markup Language) lassen sich hierarchisch aufgebaute Dateistrukturen beschreiben. Die Daten liegen im Normalfall als reine Textdaten vor, die einem bestimmten Aufbau genügen müssen. Der Aufbau der jeweiligen XML-Datei für bestimmte Anwendungen ist in sogenannten Schemasprachen wie XML-Schemata oder DTD (Document Type Definition) festgehalten. XML selbst definiert nur, wie ein Dokument aussehen muss, damit es „wohlgeformt“ ist. Somit sind nur bestimmte Regeln für die Grundstruktur vorgegeben. Beispielsweise hat ein XML-Dokument genau ein „Wurzelement“, also ein Element, dem alle anderen Elemente untergeordnet sind. Wie diese Elemente benannt sind oder was für Daten sie beinhalten, ist hingegen nicht vorgeschrieben – diese Rolle übernehmen die angesprochenen Schemasprachen. Um XML als Austauschformat nutzen zu können, muss ein anwendungsspezifisches Schema entwickelt werden, das beschreibt, wie die einzelnen Elemente heißen, was für Daten sie beinhalten und welches Element genau auf welchem aufbaut. Anderl et al. (2010) erläutern ein Anwendungsbeispiel für die DF. Die XML-Spezifikation selbst sorgt nur dafür, dass dieser Aufbau sich an bestimmte Regeln hält (W3C-Konsortium 2016).

5.5.2 Standardisierungen auf XML-Basis

Da XML als Metasprache Werkzeug- und Herstellerneutralität in der Beschreibung bietet und zudem eine einfache Adaption an zukünftige Anwendungen ermöglicht, sind basierend auf XML in den vergangenen Jahren unterschiedliche Entwicklungen entstanden, die zu Standardisierungen im Datenaustausch geführt haben. Das Format liegt als sogenanntes XML-Schema vor, welches das jeweilige spezifische Metamodell beschreibt.

Zu den Standardisierungen auf XML-Basis zählt beispielsweise die in Abschnitt 5.4.4 bereits erwähnte Beschreibungssprache X3D (Extensible 3D) als Nachfolger für VRML für die Darstellung von 3D-Inhalten im Internet.

Für den Austausch von Daten zwischen 3D-Programmen wurde zudem vor einigen Jahren als offenes ebenfalls XML-basiertes Austauschformat *COLLADA* (COLLADA – COLLABorative Design Activity) für interaktive 3D-Anwendungen standardisiert (vgl. ISO/PAS 17506 2012).

CAEX (Computer Aided Engineering Exchange; vgl. IEC 62424 2016) wurde als neutrales Datenaustauschformat für statische (auch hierarchische) Objektinformationen von mehreren Industrieunternehmen und der RWTH Aachen entwickelt (vgl. auch Drath und Fedai 2004a, 2004b). Als Metadatenmodell dient es dazu, Anlagenmodelle mit beliebigen Eigenschaften zu beschreiben.

AutomationML (Automation Markup Language) ist ein ebenfalls auf XML aufgesetztes Format, das genutzt wird, um Daten über Anlagen auszutauschen. *AutomationML* (vgl. <https://www.automationml.org/>) beruht auf einem Projekt mehrerer Industriepartner sowie Universitäten und ist als neutrale Sprache seit 2008 frei verfügbar. Ziel ist, *AutomationML* als offenes Austauschformat für die Prozesse von der Planung bis zur Steuerung von Anlagen zu etablieren, um so vor allem die Kosten zu senken, die durch nicht standardisierte Datenaustauschlösungen entstehen. Mit der in 2015 erschienenen DIN-Norm (vgl. DIN EN 62714-1 2015) ist die Etablierung eines Standards umgesetzt. Damit scheint *AutomationML* für das Engineering über den Lebenszyklus hinweg im Umfeld Industrie 4.0 einen relevanten Stellenwert zu erhalten.

Zur Unterstützung der Beschreibung von industriellen Anlagen und Komponenten im Kontext Industrie 4.0 ist zudem die DIN SPEC 16592 (2016) erarbeitet worden; diese legt Regeln für universelle Schnittstellen zur Nutzung von *AutomationML* und der OPC Unified Architecture (OPC UA) als Kommunikationsprotokoll zwischen Endgeräten fest (zur OPC UA vgl. auch diverse Blättern der IEC 62541 (div.)).

5.6 Technische Systemarchitekturen

Für die Kopplung von Werkzeugen und damit den Aufbau von Werkzeugnetzwerken bietet es sich an, die klassischen Netzwerkarchitekturen der Informationstechnik zu nutzen. Diese unterscheiden sich in ihrem Aufbau grundlegend und besitzen daher verschiedene Vor- und Nachteile. Aus In-

tegrationssicht stellen sich für die Systemarchitekturen unterschiedliche Anforderungen. Diese umfassen neben den klassischen Anforderungen – wie hohe Performance und Verfügbarkeit – weitere Besonderheiten. So ist es zum Beispiel wünschenswert, dass die Nutzer mit ihren vorhandenen Werkzeugen weiter arbeiten können, ohne dass sie durch die Integration Änderungen in ihren Arbeitsabläufen hinnehmen müssen. Optimal ist es, wenn die Integration für die Nutzer so gestaltet ist, dass sie gar nicht bemerken, dass sie in einem Zusammenspiel von mehreren Werkzeugen integriert sind, sondern so arbeiten wie vor der Integration. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn die Integration nicht in der jeweiligen Anwendung ansetzt, sondern erst beim Datenaustausch mit den anderen Werkzeugen greift. So werden eine hohe Akzeptanz gewährleistet und Probleme beim Übergang zur integrativen Lösung vermieden. Auch das nachträgliche Hinzufügen von Teilnehmern in die Integrationslösung sollte so einfach wie möglich sein.

Im Folgenden werden die klassischen technischen Systemarchitekturen auf die aufgestellten Anforderungen hin überprüft und bewertet.

5.6.1 Point-to-Point-Architektur

Bei der Point-to-Point-Architektur kommuniziert jeder Teilnehmer A bis F direkt mit anderen Teilnehmern (siehe Abb. 5.5). Aufgrund der direkten Form der Kommunikation treten hierbei im Normalfall die geringsten Latenzen (zeitliche Verzögerungen bei der Datenübertragung) auf; zudem ist der Ausfall eines beliebigen Teilnehmers nicht kritisch für das Zusammenspiel des ganzen Netzes.

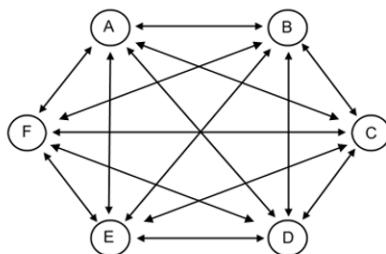


Abb. 5.5 Point-to-Point-Architektur

Jedoch muss darauf geachtet werden, dass sich die jeweiligen Teilnehmer verstehen. In heterogenen Netzen, in denen Teilnehmer un-

terschiedlicher Art beteiligt sind, ist dies nicht automatisch gegeben. Zudem ist bei der Point-to-Point-Architektur das Hinzufügen eines weiteren oder das Austauschen eines vorhandenen Teilnehmers sehr aufwendig, da Verbindungen zu allen Kommunikationspartnern eingerichtet werden müssen. Die Anfangskosten für diese Architektur sind vergleichsweise gering, da keine zusätzlichen Komponenten angeschafft werden müssen, um die Kommunikation zu ermöglichen. Der Aufwand für das Hinzufügen neuer Teilnehmer oder das Austauschen vorhandener Teilnehmer sorgt jedoch für vergleichsweise hohe Folgekosten und ist entsprechend unflexibel.

5.6.2 Hub&Spoke-Architektur

Die Hub&Spoke-Architektur (Nabe&Speiche-Architektur) wird auch häufig als Stern-Topologie bezeichnet (siehe Abb. 5.6).

Hierbei läuft die Kommunikation der einzelnen Teilnehmer über einen zentralen Austauschpunkt, den Hub. Dieser ist zugleich die größte Schwachstelle des Systems: Fällt der Hub aus, ist die gesamte Kommunikation aller Teilnehmer gestört. Zudem stellt der Hub einen klassischen Flaschenhals dar. Er muss somit beim Hinzufügen neuer Kommunikationsteilnehmer entweder genug Reserven haben oder entsprechend ausgebaut werden.

Der große Vorteil dieser Architektur liegt darin, dass jeder Teilnehmer des Netzes nur direkt mit dem Hub kommunizieren können muss und daher nur einen einzigen Kommunikationsweg benötigt. Um die Vermittlung der Kommunikation von einem Teilnehmer zum gewünschten Ziel kümmert sich der Hub. Daher lassen sich neue Teilnehmer mit vergleichsweise geringem Aufwand hinzufügen. Aufgrund dieser Tatsache besitzt das System eine hohe Flexibilität. Da der Hub zwischen allen Teilnehmern vermitteln kann, ist die Topologie zudem gut für komplexe Datenverteilungsmechanismen geeignet.

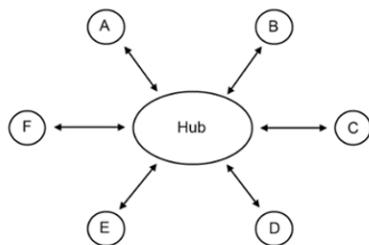


Abb. 5.6 Hub&Spoke-Architektur

5.6.3 Bus-Architektur

Bezüglich ihres Grundprinzips ähnelt eine Bus-Architektur der Hub&Spoke-Architektur; auch hier sind alle Teilnehmer mit einem zentralen Austauschpunkt, in diesem Fall dem Bus, verbunden (siehe Abb. 5.7).

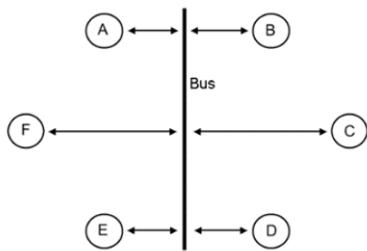


Abb. 5.7 Bus-Architektur

Der Bus hat jedoch keine vermittelnde Funktion wie der Hub, sondern er stellt Informationen, die er von einem Teilnehmer erhält, allen angeschlossenen Teilnehmern zur Verfügung. Ein Teilnehmer schickt die Daten, die er übertragen möchte, lediglich auf den Bus; der Empfänger muss darauf achten, dass er die Informationen auf dem Bus liest und weiterverarbeitet. Da bei dieser Architektur – wie bei der Hub&Spoke-Architektur – jeder Teilnehmer nur eine Verbindung besitzt, lassen sich auch in diesem Fall mit vergleichsweise geringem Aufwand Teilnehmer austauschen und neue hinzufügen.

Aufgrund der Tatsache, dass jeder Teilnehmer über jede Kommunikation auf dem Bus unterrichtet ist, eignet sich diese Architektur hervorragend für eine 1:n Datenverteilung (z. B. Broadcast, d. h. Versenden einer Nachricht an alle Teilnehmer) und für eine n:1 Datensammlung (z. B. Data Warehouse). Jeder Teilnehmer kann die Rolle des Verteilers bzw. Sammlers übernehmen; neue Teilnehmer für diese Aufgaben lassen sich nachträglich problemlos hinzufügen.

5.7 IT-Lösungen zur technischen Werkzeugintegration

Die IT eines Unternehmens steht vor der Herausforderung, sich durch Änderungs- und Anpassungsfähigkeit auf ein dynamisches, zunehmend globales Unternehmensumfeld einzustellen zu müssen. Unternehmensstrukturen ändern sich bedingt durch Wachstum und Integration; Unternehmenspro-

zesse müssen immer häufiger mit den Unternehmensprozessen der Kunden als Partner vernetzt werden. Durch verstärkt kollaborative Planungsprozesse sind unterschiedliche Werkzeuge integriert zum Einsatz zu bringen.

Grundsätzlich dienen IT-Lösungen zur technischen Werkzeugintegration dazu, Daten technisch zwischen zwei oder mehreren Werkzeugen auszutauschen. Um die Kopplung zu ermöglichen, gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, von denen im Folgenden einige beispielhaft aufgegriffen und erläutert werden.

5.7.1 Filetransfer

Die klassische Methode, Daten zwischen verschiedenen Anwendungen auszutauschen, ist der Filetransfer. Die Daten werden in einem bestimmten Datenformat als Datei (engl.: file) abgespeichert und von der nächsten Anwendung eingelesen. Hierbei muss sichergestellt sein, dass diejenigen Werkzeuge, zwischen denen ein direkter Austausch stattfinden soll, ein gemeinsames Datenformat besitzen, mit dem sie umgehen können. Dies ist bei einer Vielzahl eingesetzter Werkzeuge in der Regel nicht trivial, insbesondere da einige Datenformate Beschränkungen unterliegen, auf die bei der Erstellung der Daten zu achten ist. Häufig werden auch bestimmte Teildaten nicht oder nur unzureichend in andere Datenformate übernommen, wodurch sich der Datenaustausch zusätzlich erschweren kann (Verlust von Daten). Aufgrund dieser Probleme eignet sich der direkte Filetransfer nur bei einer kleinen Anzahl von teilnehmenden Anwendungen.

5.7.2 Netzwerkprotokolle

Netzwerkprotokolle sind die Grundlage der in Abschnitt 5.6 vorgestellten Architekturen und bieten sich an, um die Daten nicht auf einem Datenträger physisch von einem Teilnehmer zu einem anderen schicken zu müssen. Netzwerkprotokolle können z. B. in einfacher Form genutzt werden, um den unter Abschnitt 5.7.1 beschriebenen Filetransfer über ein Netzwerk durchzuführen oder im komplexeren Fall, um Anwendungen direkt miteinander kommunizieren zu lassen. Der Nachteil von Netzwerkprotokollen ist, dass beide Kommunikationspartner gleichzeitig verfügbar und auf die Kommunikation eingestellt sein müssen.

Dies ist bei einer Point-to-Point-Architektur tendenziell schwierig: hier bietet sich eine serverbasierte Architektur an. Bei einer derartigen Architektur übermittelt ein Teilnehmer die gewünschten Daten an einen Server, und andere Teilnehmer können sich diese jederzeit dort abholen. Sofern es gewünscht ist, können bei einem solchen Ansatz auch Datensicherungen

und entsprechende Protokolle zentral auf dem Server angelegt werden. Netzwerkprotokolle sind auch die Grundlage für Enterprise Application Integration (EAI, Abschnitt 5.7.3) und service-orientierte Architekturen (SOA, Abschnitt 5.7.4).

5.7.3 Enterprise Application Integration

Die Enterprise Application Integration (EAI, vgl. Keller 2002) ist ein Ansatz, um mehrere Anwendungsprogramme verschiedener Art in einem gemeinsamen System zu integrieren. Der Vorteil liegt darin, dass im Gegensatz zu anderen Integrationstechniken die einzelnen Funktionen nicht verändert werden. EAI greift also nur beim Austausch der Daten zwischen den einzelnen Anwendungen ein, ohne dass dabei die vorhandenen Werkzeuge angepasst werden müssen. Die Anwendungen kommunizieren mit dem sogenannten Business-Bus oder auch EAI-Backbone (deutsch: Rückgrat), der die Integrationsplattform darstellt. Um die Vermittlung zwischen den eingesetzten Lösungen zu ermöglichen, wird bei EAI auf (häufig WEB-gestützte) externe Anwendungssysteme zurückgegriffen. Wird EAI über eine Hub&Spoke- oder Bus-Architektur umgesetzt, müssen Anpassungen nur beim Übergang der Daten auf den Hub bzw. Bus erfolgen, die Teilnehmer selbst bleiben davon unberührt. Dies hält die Kosten gering und verhindert, dass die Nutzer des Systems sich auf Veränderungen an der von ihnen genutzten Software einstellen müssen.

Auch die Integration neuer Anwendungen ist bei EAI vergleichsweise einfach, da diese nur an den Business-Bus „angekoppelt“ werden müssen. Dies geschieht im Normalfall durch ein spezielles Modul, das die Daten auf dem Business-Bus für die Anwendung aufbereitet und im Umkehrfall die Daten der Anwendung auf den Bus überträgt. Dadurch ist weder eine Anpassung auf Seiten der Anwendung, noch auf Seiten der Integrationsplattform notwendig. Die Module arbeiten daher als eine Art „Übersetzer“.

Das Konzept von EAI ist ähnlich dem der service-orientierten Architekturen (SOA, vgl. Abschnitt 5.7.4), wobei SOA quasi als Weiterentwicklung gesehen werden kann. Einige Aspekte von EAI finden sich auch bei SOA wieder, andere wurden weiterentwickelt oder modifiziert. Generell wird EAI jedoch zunehmend von SOA abgelöst.

5.7.4 Service-orientierte Architektur

Die service-orientierte Architektur (SOA) wird als ein Konzept oder auch als ein Architekturmuster diskutiert, das die Geschäftsfelder und die IT eines Unternehmens nach Diensten bzw. Services strukturiert, welche modu-

lar aufgebaut sind und flexibel zur Umsetzung von Geschäftsprozessen genutzt werden können. Eine SOA lässt sich also nicht als fertiges Produkt auf dem Markt kaufen. Vielmehr ist SOA ein Konzept, das jeweils auf die individuellen Gegebenheiten – sowohl hinsichtlich der Organisation als auch der bestehenden Anwendungen – eines Unternehmens angepasst werden muss. Somit ist auch eine SOA-Implementierung nie ganz abgeschlossen, sondern entwickelt sich mit dem Unternehmen vor dem Hintergrund möglicher neuer Marktanforderungen weiter, indem neue oder geänderte Geschäftsprozesse durch eine Anpassung oder Erweiterung bestehender Services umgesetzt werden.

Ausgehend von seiner ersten Erwähnung durch Gartner im Jahre 1996 (vgl. Natis 2003) hat sich für SOA bis zum heutigen Zeitpunkt keine letztendlich gültige Spezifikation herausbilden können, jedoch wird eine SOA allgemein durch verschiedene Merkmale beschrieben (vgl. Bening und Zimmer 2006; Richter et al. 2005; OASIS 2006), die zu folgender Definition zusammengefasst werden können.

SOA ist ein (technologieunabhängiges) Architekturkonzept, welches ein System beschreibt, das aus einzelnen, funktional klar definierten Anwendungsbausteinen besteht.

Die *Anwendungsbausteine* ihrerseits bieten sich ihre Funktionalitäten gegenseitig in Form von Services an und lassen sich lose miteinander koppeln.

Ein *Service* ist eine eindeutig definierte Leistung, die über eine standardisierte Schnittstelle abgerufen werden kann, die wiederum die Implementierung des Services kapselt. Zu jeder Schnittstelle existiert ein Servicevertrag, der die funktionalen und nichtfunktionalen Merkmale (Metadaten) der Schnittstelle beschreibt. Services sind über ein Verzeichnis lokalisierbar.

Zur Umsetzung der Services beinhaltet die SOA ein Rollenmodell, das zwischen Dienstanbieter und -nutzer sowie einem Dienstverzeichnis als Vermittlungsinstanz unterscheidet. Die Anpassung einer gemäß SOA realisierten Softwarelandschaft an bestimmte Geschäftsprozesse erfolgt über die sogenannte Orchestrierung von Services, also die Koordination bzw. Zusammenfassung von Services zu einer höherwertigen Serviceleistung, die letztendlich einem Kunden zur Verfügung gestellt wird.

Grundsätzlich überträgt das Konzept der SOA damit altbewährte Prinzipien des Software Engineering wie funktionale Trennung und Kapselung von Implementierungsdetails auf die Anwendungslandschaft. „Die elementaren Grundgedanken der SOA sind die Trennung der Zuständigkeiten

nach fachlichen Gesichtspunkten sowie die Kapselung technischer Details.“ (Richter et al. 2005, S. 413).

Abbildung 5.8 verdeutlicht die Unterschiede einer Implementierung vor und nach der Einführung von SOA.

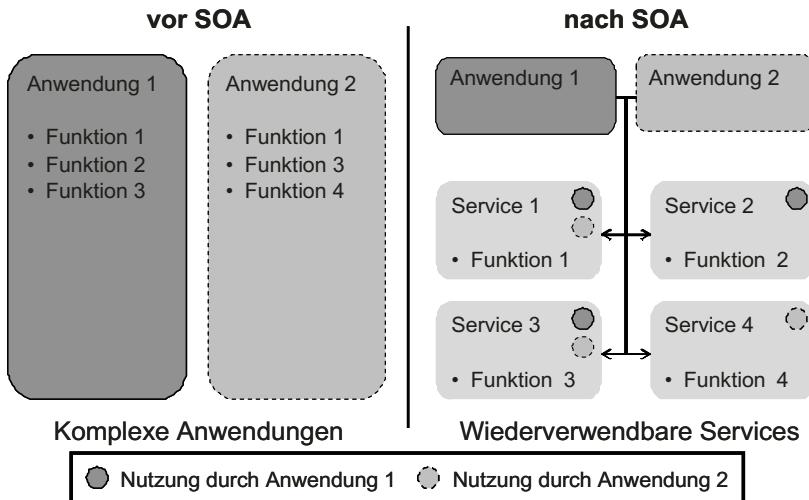


Abb. 5.8 Die Nutzung wiederverwendbarer Services durch SOA

Die wichtigsten Nutzenpotenziale von SOA lassen sich laut Richter et al. (2005) wie folgt zusammenfassen:

- Unternehmen können schnell neue oder geänderte Geschäftsprozesse realisieren, indem sie bestehende Services ohne großen technischen Aufwand anpassen.
- Durch die Kapselung von Implementierungsdetails lässt sich die IT des Unternehmens weniger komplex und somit besser beherrschbar gestalten.
- Durch eine einheitliche SOA-Infrastruktur sowie die Wiederverwendung von Services lassen sich mittelfristig Kosten für Entwicklung und Wartung einsparen.
- Bewährte Legacy-Systeme, d. h. historisch gewachsene Anwendungsprogramme (Altsysteme), können als Services gekapselt betrieben und ggf. in einer mittel- bis langfristigen evolutionären Entwicklung durch neue Systeme ersetzt werden.
- Durch die Standardisierung wird das Outsourcing von Geschäftsprozessen oder einzelner Services erleichtert.

Die Vorteile von SOA bringen Krallmann und Schönherr (2008) über die Aspekte Wiederverwendung, Flexibilität, Kosteneffizienz, Transparenz, Time-to-Market neuer Services, hohe Kompatibilität und ein effizientes Management auf den Punkt.

Allerdings ist die Umsetzung eines SOA-Vorhabens mit erheblichen Risiken verbunden, da aufgrund einer wenig gefestigten Abgrenzung und Begriffswelt enorme Reibungsverluste bei SOA-Projekten zu erwarten sind. Ebenso fehlt eine einheitliche Methodik zur Definition von Services und zur Modellierung einer Anwendungslandschaft als SOA. Damit verlangt die Umsetzung einer SOA „viel Erfahrung bei der Gestaltung großer IT-Systeme sowie methodische Kreativität.“ (Richter et al. 2005, S. 414). Die lokale Entwicklung individueller kompakter Services sowie deren Orchestrierung zur Unterstützung komplexer Geschäftsprozesse erfordern nicht nur ein umfassendes IT-Projektmanagement, sondern setzen auch eine vorausschauende Vorgehensweise bei den Fachbereichen voraus. Hinzu kommt, dass Point-to-Point-Systemkopplungen hinsichtlich der Performance weitaus besser aufgestellt sind als SOA-Architekturen, die auf eine lose Kopplung, die Auslegung der Services auf Wiederverwendbarkeit und die Verwendung standardisierter Protokolle Wert legen.

Eine SOA lässt sich mit Hilfe von Technologien wie z. B. CORBA (CORBA – Common Object Request Broker Architecture, vgl. OMG 2004) oder der Java Platform, Enterprise Edition (Oracle 2016) realisieren, jedoch werden im Zusammenhang mit ihrer Realisierung zumeist Web Services (zu Web Services vgl. W3C-Konsortium 2016; Kossmann und Leymann 2004) als ideale Basis genannt. Web Services bezeichnen im Wesentlichen „ein Bündel von Technologien zur Beschreibung von Schnittstellen und Eigenschaften von Implementierungen dieser Schnittstellen, Beschreibung von Datenaustauschformaten und Qualitätseigenschaften des Datenaustauschs, Registrierung von Komponenten, Komposition von Komponenten und Sicherheit im Austausch mit Komponenten“ (Kossmann und Leymann 2004, S. 117). Sie unterstützen ein neues Paradigma für verteilte Systeme mit einem autonomen Agieren aller Teilnehmer. Allerdings führt weder die Nutzung von Web Services automatisch zu einer SOA noch sind diese mit einer SOA gleichzusetzen. So ist u. a. durch die Nutzung von Web Services keinesfalls sichergestellt, dass sich implementierte Web Services zur Ausrichtung an einem Geschäftsprozess auch geeignet orchestrieren lassen.

Die Umsetzung von SOA wird heute in unterschiedlichen verteilten Systemlösungen in den Unternehmen angegangen und führt zurzeit im Kontext der DF auch zu neuen Systemimplementierungen. Ein SOA Management Framework mit seinen Funktionalitäten wird in Krallmann und Schönherr (2008) vorgestellt. Konkrete Regeln für den Aufbau einer quali-

tativ hochwertigen SOA, beispielsweise für die richtige Komponentenbildung oder das Design von Services und ihren Operationen, werden in Hess et al. (2006) diskutiert. Hier findet sich auch eine umfassende Literaturzusammenstellung zu SOA.

Bereits heute wird deutlich, dass SOA auch eine wichtige Rolle bei der Umsetzung von Lösungen zum Internet der Dienste im Rahmen von Industrie 4.0 spielt. So wird beispielsweise im Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) explizit SOA als gemeinsamer Mechanismus für die Integration benannt (VDI/VDE 2015).

5.7.5 High Level Architecture

Begründet aus dem Bedarf zur verteilten, interaktiven Simulation und der Realisierung von synchron gekoppelten Simulationswerkzeugen beschloss das amerikanische Department of Defence (DoD) 1995 die Entwicklung eines technischen Rahmenwerks für die Modellierung und Simulation, um die Interoperabilität von heterogenen Simulationswerkzeugen umzusetzen. Die vom Defence Modeling and Simulation Office (DMSO) entwickelte und zunächst auf militärische Anwendungen begrenzte HLA-Architektur (HLA – High Level Architecture) ist selbst keine IT-Lösung, sondern eine Infrastrukturspezifikation, die vorgibt, wie beteiligte Simulationswerkzeuge, Animationswerkzeuge, Datenbanken oder auch reale Komponenten zeitlich synchron miteinander kooperieren. Die HLA ist bereits 2000 zum IEEE-Standard erhoben worden; als aktuelle Richtlinie liegt die IEEE 1516 (2010) vor.

Die sogenannte Runtime Infrastructure (RTI) stellt die Umgebung für die Interaktion der kooperierenden Systeme zur Verfügung und bietet Koordinations- und Kommunikationsdienste zur Laufzeit an. Die Kopplung über eine zentrale Vermittlungsschicht erlaubt eine allgemeingültige und auch auf andere Werkzeuge übertragbare Schnittstellendefinition. Die Schwierigkeit der Anwendung liegt in der Entwicklung HLA-spezifischer Schnittstellen und der Definition der auszutauschenden und zu teilenden Informationen. Zurzeit existiert in Deutschland beispielsweise die softwaretechnische Realisierung GERTICO (Fraunhofer 2016).

5.8 Integrative Lösungskonzepte

Die Vernetzung von Methoden, Modellen und Werkzeugen in der DF impliziert die Modellierung von Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten in digitaler Form und ihre ganzheitliche, integrative Verwaltung. Die heute

am Markt angebotenen Werkzeuge für die DF stammen in erster Linie von den Firmen Dassault und Siemens Systèmes (vgl. die Abschnitte 5.8.1 und 5.8.2). Neben diesen Produktpaletten gibt es auch reine Integrationsplattformen. Als Stellvertreter hierfür wird die Lösung XPLM in Abschnitt 5.8.3 kurz vorgestellt. Abschließend wird auf aktuelle Integrationsbestrebungen zur virtuellen Inbetriebnahme und zum Digitalen Fabrikbetrieb eingegangen (Abschnitt 5.8.4).

Die Entwicklungsstrategien der Systemanbieter zielen auf die Nutzung der digitalen Produktentstehung und die Beherrschung der Produktions- und Fabrikplanung sowie die Verbindung zur Produktion ab. Dabei spielen entsprechend der Definition zur DF die einzelnen Methoden und Werkzeuge, ihre geeignete Vernetzung, die Verwaltung der notwendigen Daten über ein geeignetes ganzheitliches Datenmanagement und die Kollaboration der beteiligten Akteure im Engineeringprozess eine entscheidende Rolle. Gleichzeitig besteht seitens der Systemanbieter der Wunsch, auch Erweiterungen in Richtung eines ganzheitlichen PLM-Ansatzes sowie einer Integration von übergeordneten und unternehmensübergreifenden Aufgabenstellungen, beispielsweise für ein Supply Chain Management (SCM), umzusetzen. Die Produktpaletten werden daher im Sinne übergreifender PLM-Lösungen erweitert. Ausgehend von ERP-Systementwicklungen werden PLM-Lösungskonzepte mittlerweile auch von Unternehmen wie SAP oder Oracle angeboten.

Die in den Abschnitten 5.8.1 und 5.8.2 vorgestellten Produktpaletten der Systemanbieter sind sicherlich den unternehmensspezifischen IT-Strategien unterworfen und stellen daher machbare, aber nicht zwangsläufig in den Unternehmen umgesetzte Lösungen dar. Sie spiegeln somit nicht die zurzeit existierenden realen Umsetzungen in Unternehmen wider.

Basis zukünftiger Unternehmenssoftware muss eine sogenannte emergente Software (vgl. beispielsweise Software-Cluster 2017) darstellen, die dynamisch und flexibel beliebige Werkzeuge unterschiedlicher Hersteller kombinieren kann, sich an die Anforderungen des Marktes anpasst (Adaptivität) und sich verändernde, komplexen Unternehmensnetzwerke unterstützt (Agilität).

5.8.1 Produktpalette Dassault Systèmes

Die Firma Dassault Systèmes entwickelt seit über 30 Jahren Technologien und Lösungen, um eine digitale Transformation in der Industrie – von der Automobilbranche über den Maschinen- und Anlagenbau bis hin zur Medizintechnik – zu unterstützen. Sie bietet hierzu Softwarelösungen an, die auf Basis der offenen 3DEXPERIENCE Plattform eine nahtlose Integri-

on der einzelnen zur Firmengruppe gehörenden Marken ermöglichen soll. Mit dieser Plattform kann die gesamte Wertschöpfungskette ausgehend vom Marketing, über Entwicklung, Produktion und Vertrieb bis hin zum Endkunden gemeinschaftlich betrachtet werden. Die Plattform bringt jeweils die aktuellste Version aller Daten und Entwürfe an einem Ort zusammen und soll Branchenlösungen (Industry Solution Experiences) und Anwendungen die ineinander greifen bieten. Ihr Hauptziel ist die Unterstützung des Anwenders, damit er in der vernetzten und hochkomplexen Welt die richtige Entscheidung trifft. So können Unternehmen digitale und reale Welten miteinander vernetzen.

Die offene 3DEXPERIENCE Plattform (vgl. Abb. 5.9) vermeidet Medienbrüche und organisiert dabei sowohl die Daten als auch die Zusammenarbeit der Menschen, die mit diesen Daten arbeiten. Wissen lässt sich auf diese Weise unternehmensweit nutzen. Über eine einheitliche Oberfläche können Anwender auf Branchenlösungen sowie die folgenden elf Marken von Dassault Systèmes zugreifen:

- CATIA – Digitale Produkterlebbarkeit
- BIOVIA – Virtuelle Biosphäre und Werkstoffe
- DELMIA – Weltweite Fertigungsabläufe
- ENOVIA – Vernetzte Innovation
- EXALEAD – Information Intelligence
- GEOVIA – Virtueller Planet
- NETVIBES – Intelligente Dashboards
- SOLIDWORKS – Inspiring Innovation
- SIMULIA – Realistische Simulation
- 3DEXCITE – Marketing im Zeitalter der Erlebnisse
- 3DVIA – Kommunikation in 3D



Abb. 5.9 Aufbau und Funktion der 3DEXPERIENCE Plattform für das Systems Engineering (Quelle: Dassault Systèmes)

Die Lösungsübersicht basiert auf den 3DEXPERIENCE Plattform Services einschließlich unterschiedlicher Standardformate und mehr als 70 Konnektoren zu Drittanbieter-Tools für das Systems Engineering.

Die Plattform unterstützt dabei das Systems Engineering in den folgenden vier Bereichen:

- Model-Based Systems Engineering: Hierzu gehören webbasierte Werkzeuge zur Anforderungserhebung, -analyse und -verwaltung und zur Traceability sowie Systemarchitekturwerkzeuge zur Modellierung von statischen Strukturen und dynamischem Verhalten von Systemen.
- Mechatronisches Engineering: Die interdisziplinäre Modellierung und Simulation von dynamischem Verhalten ist Bestandteil des mechatronischen Engineering zur Entwicklung von Steuerungs- und Regelungssystemen sowie zur Auslegung von Komponenten.
- Eingebettete elektronische Architekturen: Die durchgängige Lösung zur Entwicklung von eingebetteten Systemen (Embedded Systems) im Fahrzeug ist eine spezielle Ausprägung der Architekturentwicklung für Fahrzeugsteuergeräte sowie deren Sensorik und Aktorik und erlaubt Funktionen auf elektronische Bauteile zu partitionieren, damit eine sichere Kommunikation über die Busnetzwerke im Fahrzeug gewährleistet und entsprechende Softwarekomponenten definiert werden können. Die Softwarekomponenten können direkt auf Basis des AUTOSAR-Standards (AUTOSAR – AUTomotive Open System ARchitecture) entwickelt und getestet werden.
- Systemsicherheit und Validierung: Die Untersuchung von sicherheitsrelevanten Systemeigenschaften erfolgt mithilfe von FTA (FTA – Fault

Tree Analysis) und FMEA. Die Ergebnisse dienen als Basis zur Funktionsabsicherung im Systemtest. Die Tests werden dabei mit Modellen und Anforderungen verknüpft und bleiben damit nachvollziehbar.

Darüber hinaus werden alle Systems Engineering-Tätigkeiten über ein Projekt-, Konfigurations- und Änderungsmanagement unterstützt.

Mit diesem umfangreichen Lösungskonzept haben Kunden von Dassault Systèmes beispielsweise Zugriff auf 3D-Daten und Stücklisten im Kontext der Produktnutzung, profitieren aber auch von einem optimierten Produktdesign, das auf den Erkenntnissen der realen Nutzung basiert. Unterstützt von 3D-Daten, Simulation und AR können Unternehmen virtuell den Erlebniswert ihrer Designs bewerten und diese anschließend in Echtzeit mittels präziser Simulationsdaten verbessern und produzieren. Produkt und Prozesse werden systemisch und gesamtheitlich betrachtet. Ein weltweit tätiges Unternehmen soll damit in die Lage versetzt werden, den Fertigungsprozess global zu planen und dennoch flexibel auf lokale Spezifika einzugehen.

5.8.2 Digital Enterprise Suite von Siemens

Das Angebot zu Toollösungen von DF, PLM und Automation im Kontext Industrie 4.0 fasst die Siemens AG unter dem Stichwort *Digital Enterprise* zusammen. Die Lösungen bestehen als Kernelement aus der *Digital Enterprise Suite*, die um Software für industrielle Kommunikation, Sicherheit und Services ergänzt wird. Das Portfolio der Digital Enterprise Suite umfasst softwarebasierte Systeme für die diskrete Industrie, mit denen alle Anforderungen der industriellen Wertschöpfungskette abdeckt werden sollen.

Teamcenter stellt die Kollaborationsplattform dar, über die PLM, MES/MOM (MOM – Manufacturing Operations Management), TIA (TIA – Totally Integrated Automation) und Lifecycle and Data Analytics miteinander verbunden werden (siehe Abb. 5.10).

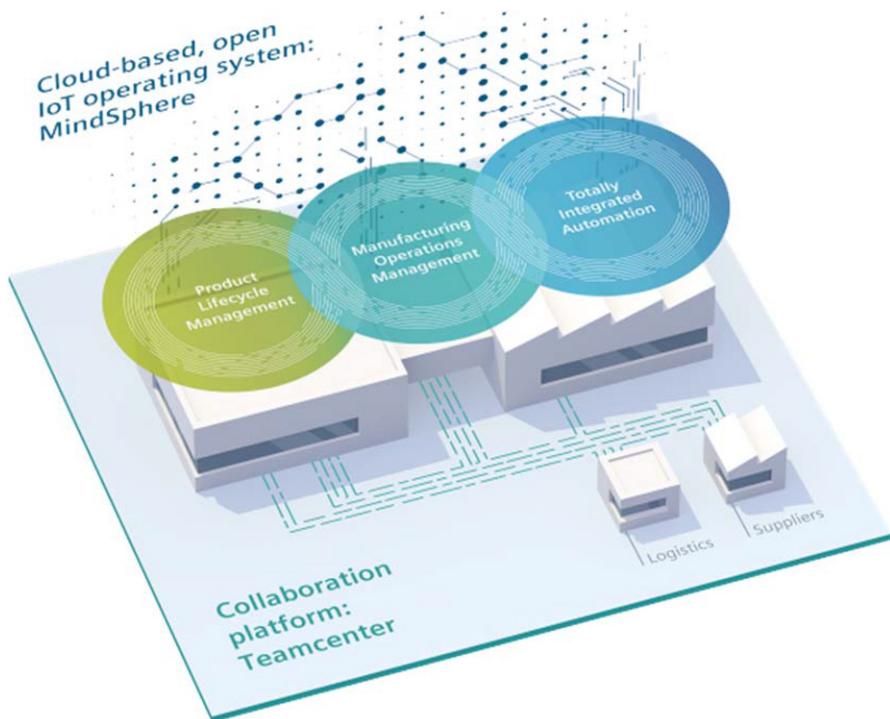


Abb. 5.10 Plattformlösungs-Konzept auf Basis von Teamcenter (Quelle: Siemens AG)

Über *Teamcenter* als offene Architektur wird es möglich, das Wissen über Fertigungsdaten, -prozesse, -ressourcen und -anlagen in der PLM-Umgebung zu verwalten, die auch für die Produktentwicklung verwendet wird. Damit soll eine Softwareplattform für ein kollaboratives Produktdatenmanagement zur Verfügung stehen, das als einheitliche Datenplattform (Data backbone) Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern weltweit den Zugriff auf eine gemeinsame Datenbasis zur nahtlosen und effizienten Integration und Kooperation ermöglicht. *Teamcenter* unterstützt die Definition, Verbreitung und Kontrolle kompletter digitaler Produktmodelle, der dazugehörigen Dokumente und Informationen sowie der assoziierten Prozesse und Ressourcen über den ganzen Produktlebenszyklus. Über eine Web-Infrastruktur werden die Produktinformationen verwaltet und gemeinsam genutzt. Die Interoperabilität zwischen verschiedenen IT-Systemen und die Einbindung des gesamten Unternehmens mit verteilten Standorten, Partnern, Lieferanten und Kunden werden über das auf einer serviceorientierten Architektur basierende Systemkonzept und die Nutzung von Industriestandards ermöglicht. Über gemeinsam nutzbare virtuelle Arbeits-

räume lassen sich Diskussionen führen, Projekte planen und Ergebnisse abstimmen.

In Ergänzung kommen für Design und Planung *Tecnomatix* und das *NX-Produktpfolio* zum Einsatz. Mit der Produktpalette zu Tecnomatix werden die Prozessplanung, die Simulation von Fabrik- und Fertigungsabläufen, die Gestaltung des Fabriklayouts, ergonomische Untersuchungen, das Qualitätsmanagement und eine nahtlose Verknüpfung mit übergeordneten Planungssystemen unterstützt.

Das *NX-Produktpfolio* fokussiert auf Konstruktions- und Fertigungsprozesse unter Nutzung der erzeugten digitalen Produktdaten, stellt eine integrierte KBE-Umgebung (KBE – Knowledge Based Engineering) bereit und verwaltet direkt im Entwicklungsprozess CAD-Dateien, Zeichnungen, Dokumente und Tabellen, Simulationsszenarien, Testdaten und Ergebnisse, NC-Codes und Werkzeuginformationen.

Ergänzend sind in der realen Produktion Produkte wie SIMATIC IT als MES sowie Automatisierungs- und Antriebssystemen aus dem TIA-Portfolio im Einsatz.

Mit der *Digital Enterprise Suite* können produzierende Unternehmen ihre Geschäftsprozesse einschließlich der Geschäftsprozesse ihrer Zulieferer durchgängig digitalisieren. Je nach Bedarf im eigenen Unternehmen kann die Digitalisierung an jedem Punkt der Wertschöpfungskette vom Produktdesign bis zum Service begonnen und ausgebaut werden, so dass sukzessive ein digitales Abbild der Wertschöpfungskette entsteht. Ziel ist es, den gesamten Lebenszyklus des Produktes sowie der Produktion im Sinne eines digitalen Zwillings abzubilden (siehe Abb. 5.11).



Abb. 5.11 Die Idee des Digitalen Zwillings (Quelle: Siemens Industry Software GmbH)

Mit einer durchgängigen Datenintegration lassen sich alle Vorteile der Digitalisierung nutzen. In der Lösung von Siemens soll dies durch eine Integration industrieller Software- und Automatisierungslösungen, einem Ausbau der Kommunikationsnetzwerke, einer Umsetzung von Sicherheitslösungen in der Automatisierung und einer Nutzung von geschäftsspezifischen industriellen Services erreicht werden.

5.8.3 Integrationsplattform der XPLM Solution GmbH

Die Firma XPLM Solution GmbH bietet keine eigene Produktpalette zur DF oder zu PLM an, sondern Basisdienstleistungen und Lösungen zur Integration von CAD-, ERP- und PLM-Anwendungen. Das Konzept der In-

tegrationsplattform mit standardisierten Konnektoren ist so gestaltet, dass entsprechend den Kundenanforderungen die jeweiligen unternehmensspezifischen Werkzeuge miteinander vernetzt werden (siehe Abb. 5.12).

Die Integrationsplattform erlaubt die Kollaboration in verteilten Arbeitsgruppen und stellt zusätzlich zum Austausch und zur Synchronisation von Daten standardisierte Prozesse zur Unterstützung der Systeminteraktion und des Datenaustauschs sowie ein Konfigurationsmanagement zur Anpassung der Prozesse und Datenmodelle zur Verfügung. Dokumentenerstellung, -verwaltung und -publikation werden über firmeneigene Software ebenfalls unterstützt. XPLM arbeitet eng mit Oracle zusammen, steht aber auch in Lösungs- und Dienstleistungspartnerschaft mit SAP, Aras, Infor, SolidWorks und Siemens.

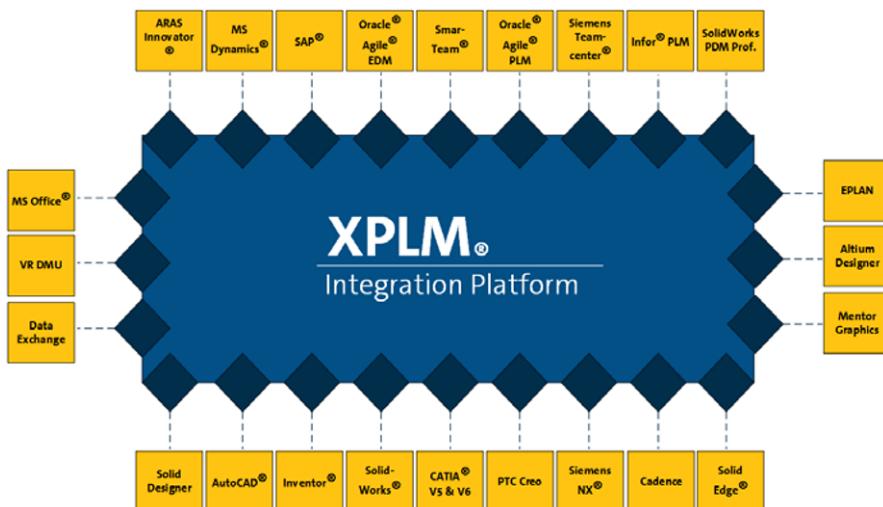


Abb. 5.12 Die Integrationsplattform XPLM (Quelle: XPLM Solution GmbH, Viernheim)

Allerdings sei darauf verwiesen, dass eine reine Integration der IT-Werkzeuge nicht ausreicht. Die organisatorische Umsetzung der zugehörigen Abläufe muss primär und vor der Realisierung der technischen Lösung gewährleistet sein (zur Einführung der Digitalen Fabrik vgl. Kap. 6).

5.8.4 Virtuelle Inbetriebnahme

Der Digitale Fabrikbetrieb (vgl. Abschnitt 1.2.2 sowie VDI 4499 Blatt 2 2011) und mit ihm die virtuelle Inbetriebnahme hat in den letzten Jahren in

vielen Unternehmen den Schritt von der reinen Forschung in den Produktivbetrieb vollzogen (Bergert et al. 2009). Typische Einsatzfelder in der Automatisierungstechnik sind beispielsweise Werkzeugmaschinen, Prozess- und Fertigungstechnik.

Die Aspekte der Integration in der virtuellen Inbetriebnahme werden in Abbildung 5.13 dargestellt (vgl. auch Abschnitt 2.5 und 7.5). Ziele der Integration der unterschiedlichen Werkzeuge in der virtuellen Inbetriebnahme sind ein gemeinsam nutzbares digitales mechatronisches Modell der Anlage und die gemeinsame Evaluierung von Roboter- und Anlagenmodell in der Simulation (vgl. auch Sandmaier et al. 2008). Die Verwendung der gemeinsamen mechatronischen Bibliothek (vgl. auch Kuhn et al. 2008) stellt die Voraussetzung für die virtuelle Inbetriebnahme dar und schafft die Integration der beteiligten Prozesse und Werkzeuge. Abbildung 5.14 verdeutlicht die Arbeitsweise und Vernetzung unter Verwendung dieser Bibliothek.

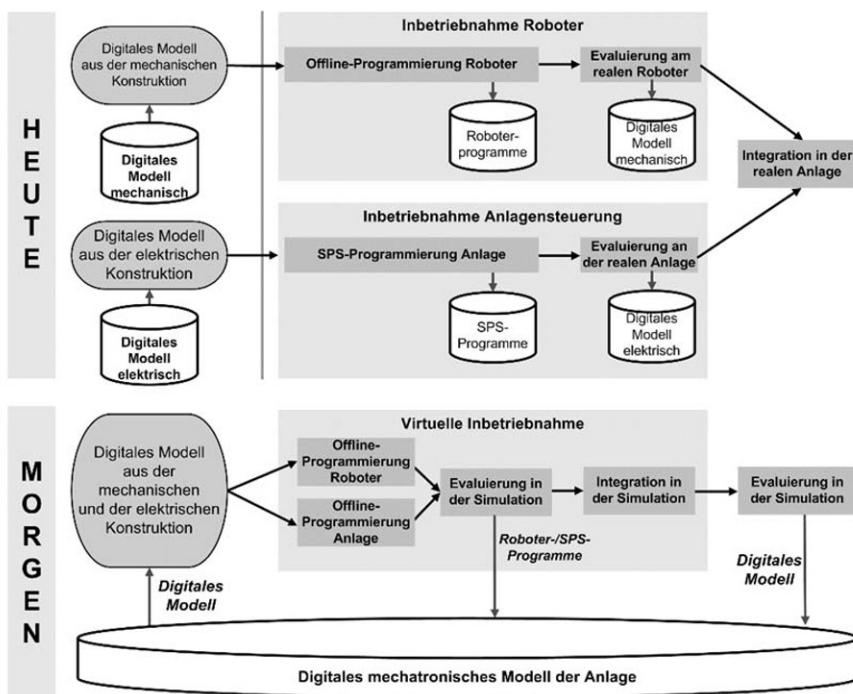


Abb. 5.13 Virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen (Quelle: KUKA Systems GmbH, Augsburg)

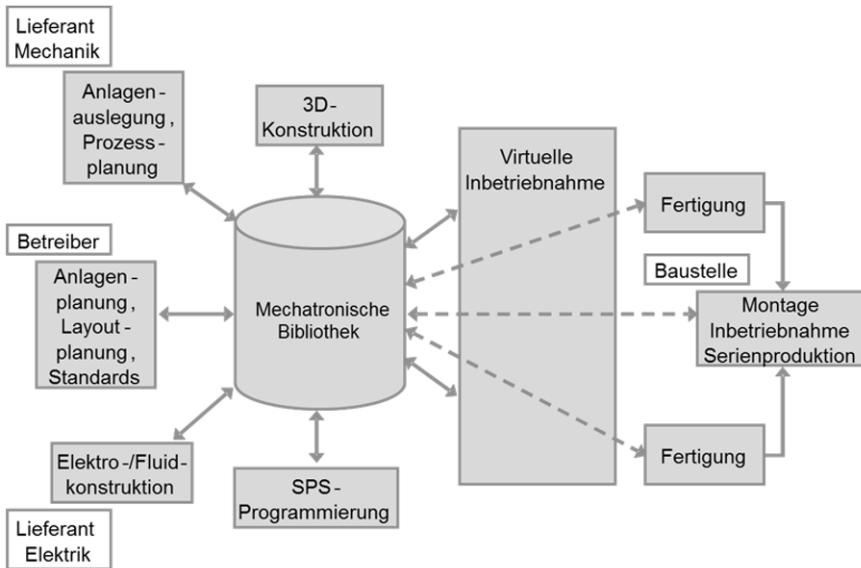


Abb. 5.14 Mechatronische Bibliothek als gemeinsames Planungs- und Entwicklungsmodell für Anlagen (nach VDI 4499 Blatt 2 2011, S. 35)

Die Planungs-/Entwicklungsaufgaben, -ergebnisse und -werkzeuge zur mechanischen Anlagenkonstruktion, Roboterprogrammierung, Elektro- und Fluidkonstruktion, NC- und SPS-Programmierung sind in die virtuelle Inbetriebnahme einzubeziehen und hinsichtlich ihrer unterschiedlich facettierten Daten und Informationen zu berücksichtigen. Die VDI 4499, Blatt 2 (2011) führt die Details hierzu weiter aus.

6 Organisation der Einführung und Nutzung

Die erfolgreiche Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF hängt von zahlreichen Faktoren innerhalb und außerhalb des Unternehmens ab. Diese gilt es im Vorfeld kritisch zu analysieren, um auf Basis der Analyseergebnisse geeignete Maßnahmen zur Umsetzung zu entwickeln. In den folgenden Abschnitten werden zunächst allgemeine organisatorische Hinweise gegeben, welche die besonders zu beachtenden Faktoren bei der Einführung hervorheben. Im Anschluss wird eine Vorgehensweise der Implementierung von Methoden und Werkzeugen der DF in KMU sowie in einem Konzern vorgestellt. Der nächste Abschnitt beschreibt eine neue organisatorische Grundstruktur, welche den Anforderungen der DF hinsichtlich Flexibilität und Wandlungsfähigkeit besonders entspricht. Den Abschluss des Kapitels bildet die Vorstellung neuer Rollen und Aufgaben der MitarbeiterInnen in der Planung und der Informationstechnik eines Unternehmens.

6.1 Allgemeine organisatorische Hinweise

Als wesentliche Problemfelder der erfolgreichen Einführung der DF sind insbesondere die bestehende IT-Landschaft (Hardware), das Versions-, Wissens- und Datenmanagement (Software), die gewachsenen Prozesse und Strukturen (Ablauf- und Aufbauorganisation) sowie das notwendige Gesamtverständnis (vgl. auch Bracht und Masurat 2005) der Betroffenen bei der Einführung der DF zu beachten (Abb. 6.1).

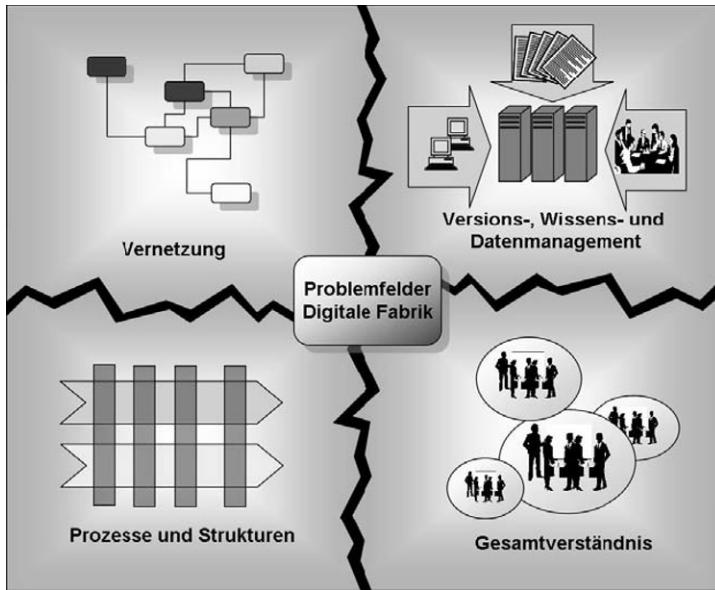


Abb. 6.1 Problemfelder der Digitalen Fabrik

Im Folgenden werden in Anlehnung an diese Problemfelder einige entscheidende Kriterien für die erfolgreiche Einführung der DF in ein Unternehmen näher betrachtet.

6.1.1 Managemententscheidung

Die Entscheidung zur Einführung der DF muss wegen der strategischen Bedeutung und des beträchtlichen Aufwandes grundsätzlich von der Unternehmensführung getroffen werden. Ohne die Unterstützung der Geschäftsleitung können viele daraus resultierende Änderungen im Unternehmen nicht konsequent angegangen werden.

Die Auslöser für die Einführung der DF können allerdings unterschiedlicher Natur sein. In großen Unternehmen überwiegen interne Gründe, wie kürzere Produkteinführungszeiten, Steigerung der Planungsqualität oder die Reduktion von Planungskosten und -zeiten. Bei kleinen und mittleren Unternehmen liegen eher externe Auslöser vor. So werden beispielsweise zur Zusammenarbeit mit Partnern (Zulieferern oder Kunden) neue Datenaustauschformate gefordert, deren Nutzung für eine langfristige Zusammenarbeit und Kommunikation erforderlich ist.

6.1.2 Anwenderakzeptanz

Die Akzeptanz der MitarbeiterInnen ist unabdingbar für den Erfolg jeglicher Maßnahmen im Unternehmen. Nur wenn die Ziele der DF von möglichst allen Beteiligten und Betroffenen mitgetragen und die Umsetzung nachhaltig vorangetrieben wird, kann sich der volle Nutzen im Unternehmen entfalten.

Die frühzeitige Information der MitarbeiterInnen über geplante Schritte ist daher eine Grundvoraussetzung für die breite Akzeptanz der späteren Maßnahmen. Eine wesentlich stärkere und nachhaltigere Akzeptanz ruft jedoch die *aktive Einbeziehung* der Betroffenen in die Planung selbst hervor; dieses Vorgehen erschließt zudem noch wichtige Wissensquellen für den Einführungsprozess.

Bei der Anschaffung neuer Softwarewerkzeuge muss neben der Funktionalität auch auf eine anwenderfreundliche und möglichst intuitive Benutzungsschnittstelle geachtet werden. Diese muss auch MitarbeiterInnen, die diese IT-Werkzeuge nur gelegentlich nutzen, eine schnelle Einarbeitung ermöglichen. Vor der Einführung ist durch Schulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen der spätere produktive Einsatz vorzubereiten, um die Nutzung des möglichst vollen Leistungsumfangs zu ermöglichen.

Eine hohe Anwenderakzeptanz besitzen Softwareprogramme, wenn sie direkt konkret erlebbare Vorteile bieten. Dazu zählen die Entlastung von Routineaufgaben durch entsprechende (teil-)automatische Funktionen, Arbeitserleichterungen durch einfache und aufwandsarme Möglichkeiten zum Datenaustausch und eine verbesserte Unterstützung von Planungsaufgaben z. B. durch abrufbares Wissen aus erweiterbaren Wissensdatenbanken.

6.1.3 Ablauf- und Aufbaustruktur

Die Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF erfordert durch die veränderten Arbeitsinhalte eine aufbau- und ablauforganisatorische Anpassung (Masurat 2006; Reinhart et al. 2008). Notwendige Veränderungen in der Ablauforganisation resultieren aus den veränderten Unternehmensprozessen durch die Methoden und Werkzeuge der DF.

Für die einzelnen MitarbeiterInnen bedeutet dies einen Wandel ihrer Arbeitsinhalte und -schwerpunkte und somit langfristig ein verändertes Anforderungs- und Stellenprofil. Auch verschieben sich häufig die bisher vorhandenen Schnittstellen zwischen Abteilungen, so dass im Zuge der Einführung die Eignung der bestehenden Aufbauorganisation an die neuen ablauforganisatorischen Prozesse geprüft werden muss. In Abschnitt 6.3

wird dazu ein Ansatz zur Neustrukturierung der Aufbauorganisation und in Abschnitt 6.4 zu den neu entstehenden Rollenkonzepten vorgestellt.

Das Unternehmen muss einen Wandel zur lernenden Organisation vollziehen. Im gleichen Maße wie sich die Produkte, die Produktionseinrichtungen und die Fabrik den veränderten Rahmenbedingungen anpassen müssen, wird dies auch in Zukunft mehr denn je für die Aufbau- und Ablauforganisation gelten. Neben der Implementierung des Change Management zur ständigen Anpassung des Workflow wird das Wissensmanagement zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor werden. Hier gilt es, das Unternehmenswissen systematisch und umfassend zu sammeln, zu verwalten und den Nutzern anforderungsgerecht zur Verfügung zu stellen.

6.1.4 Hardwareinfrastruktur

Die Einführung neuer digitaler Werkzeuge nimmt einen großen Stellenwert im Konzept der DF ein. Daher ist vorab sicherzustellen, dass die Rechner- und Netzinfrastruktur den Bedürfnissen neuer Softwareprogramme und erweiterter Datenmengen genügt. Es gilt, die gesamte Hardwarestruktur von den Servern bis zu den Anwenderrechnern auf Eignung zu prüfen und ggf. entsprechend aufzurüsten (Huber 2016).

6.2 Einführung der Digitalen Fabrik

Die Einführung der DF in ein Unternehmen ist nicht nur eine operative Maßnahme, sondern vor allem eine strategische Entscheidung. Daher ist es wichtig, dass diese Entscheidung von der Unternehmensführung ausgehend unterstützt wird. Die DF ist schrittweise entsprechend des unternehmensindividuellen Bedarfs einzuführen und muss dann intensiv gelebt werden, damit sich der Nutzen voll entfalten kann.

Bei der Festlegung einer Einführungsstrategie für ein Unternehmen ist zu empfehlen, dass ein Pilotprojekt in einem Bereich gestartet wird, in dem voraussichtlich in kurzer Zeit mit den neuen Methoden und Werkzeugen ein positives Ergebnis zu erzielen ist. Vom Erfolg des Pilotprojektes hängt im großen Maße der Gesamterfolg DF in dem Unternehmen ab. Dieses Pilotprojekt gibt den MitarbeiterInnen Vertrauen in das neue Konzept und kann sie vom Nutzen überzeugen. Ziel ist es, die Mitwirkung der motivierten MitarbeiterInnen zu gewinnen, so dass sie ihr Wissen und ihre Erfahrung in die neuen Vorgehensweisen mit einzubringen. Nur die Einbeziehung in den Veränderungsprozess kann die Angst vor Innovationen nehmen. Die MitarbeiterInnen spielen eine Schlüsselrolle in diesem Kon-

zept, da die mit der Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF verbundenen aufbau-, ablauf- und arbeitsorganisatorischen Veränderungen nur erfolgreich gemeistert werden können, wenn sie von möglichst vielen überzeugt angenommen werden (vgl. Abschnitt 6.1.2.)

Es ist davon auszugehen, dass sich die derzeit bestehende strukturelle Gliederung der Abteilungen in den Unternehmen mit dem zunehmenden Verbreitungsgrad der Methoden und Werkzeuge der DF verändern wird. Neben dem Wegfall vieler bisher notwendiger physischer Produkt- und Anlagenprototypen werden zunehmend verschiedene Fachbereiche organisatorisch zusammengefasst. Eine Neuverteilung der Aufgaben wird erfolgen müssen, um integrierte und effiziente Prozesse in der Konstruktion und Planung zu erzeugen (vgl. Abschnitt 6.3). Hinzu kommt, dass die beteiligten MitarbeiterInnen mit neuen planerischen Vorgehensweisen konfrontiert werden. Ebenfalls ist Abschied von den herkömmlichen, eher sequenziellen Phasenmodellen der Projektarbeit zu nehmen, da eine Abgrenzung der einzelnen Schritte nicht mehr sinnvoll ist, wenn alle Potenziale der DF ausgeschöpft werden sollen.

6.2.1 Einführungsphasen

Die DF erfordert ein langfristig orientiertes Durchdenken der vorhandenen Prozesse und Strukturen im Unternehmen und geht daher über die bloße Einführung einer Software weit hinaus. Zum Gelingen dieses komplexen Vorhabens bedarf es der phasenweisen Einführung (Abb. 6.2) von neuen Methoden und Werkzeugen. Insbesondere im Mittelstand ist eine sorgfältige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wichtig, um die vorhandenen Ressourcen bestmöglich einzusetzen und das richtige Maß für die sukzessive Umsetzung zu finden.

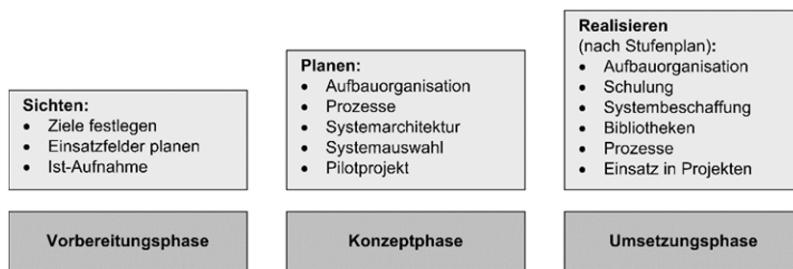


Abb. 6.2 Einführungsphasen der Digitalen Fabrik

Im Folgenden wird die Einführung der DF in Anlehnung an die (VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 28 ff.) in die drei Phasen Vorbereitung, Konzepterstellung und Umsetzung unterteilt.

Vorbereitungsphase

Die Einführung der DF bedarf einer sorgfältigen Vorbereitung. Zunächst werden die Einsatzfelder mit dem größten Potenzial für die Werkzeuge und Methoden der DF identifiziert. Jeden dieser Bereiche gilt es gezielt zu analysieren, um die Randbedingungen durch die organisatorische Verankerung, die Schnittstellen zu anderen Prozessen sowie die bisher eingesetzten Werkzeuge zu ermitteln.

Für jeden dieser Bereiche sind der Ist-Zustand sowie der angestrebte Soll-Zustand zu ermitteln. Insbesondere müssen dabei die Schnittstellen zu anderen Abteilungen – intern sowie extern – überprüft werden und ggf. Anpassungen auf die unternehmensspezifische Lösung der DF erfolgen. Dabei sind bereits bestehende und absolut nicht zu vermeidende Insellösungen, die nicht durch neue IT-Werkzeuge ersetzt werden, in das neue Gesamtkonzept möglichst gut zu integrieren.

Auf der Grundlage dieser Planung der Einsatzfelder können dann die aktuell verwendeten Softwarewerkzeuge bezüglich der notwendigen Funktionalitäten mit den möglicherweise einzukaufenden Werkzeugen verglichen werden.

Konzeptphase

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Vorbereitungsphase sind in der Konzeptphase geeignete Maßnahmen zur Umsetzung der DF zu entwickeln. Dabei ist eine geeignete Aufbauorganisation für die neuen ablauforganisatorischen Rahmenbedingungen zu definieren. Des Weiteren muss die Systemarchitektur überprüft und den zukünftigen Bedürfnissen angepasst werden.

Für die sich durch die DF wandelnden Arbeitsinhalte der MitarbeiterInnen müssen neue Anforderungsprofile formuliert und geeignete Maßnahmen zu ihrer Qualifikation vorbereitet werden.

Von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der DF ist dann – wie oben erwähnt – das Ergebnis des Pilotprojektes. Daher sollte ein geeigneter Aufgabenbereich sorgfältig ausgewählt werden.

Vor Festlegung auf ein geeignetes Konzepts werden meist Varianten entwickelt, die im Rahmen einer Bewertung miteinander zu vergleichen sind. Dabei sind neben der Nutzensteigerung in den einzelnen Bereichen

auch die Synergieeffekte, die aus einer mehrere Bereiche umfassenden Einführung resultieren, zu beachten.

Umsetzungsphase

In der Umsetzungsphase wird nun das ausgearbeitete Konzept stufenweise eingeführt. Dabei sind zunächst die personellen – durch Schulung und Qualifikation – sowie im Anschluss die systemtechnischen Voraussetzungen – durch den Aufbau einer geeigneten Systemarchitektur – zu schaffen.

6.2.2 Einführung der Digitalen Fabrik bei KMU

Zurzeit finden Methoden und Werkzeuge der DF in der Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie im Schiffbau den höchsten Verbreitungsgrad (vgl. Kapitel 1 sowie Kapitel 7). Doch auch für KMU bietet dieser Ansatz große Chancen, einen langfristigen Nutzen zu generieren, um auf die zukünftigen Anforderungen vorbereitet zu sein (Wiendahl 2002a). Allerdings ist das bestehende Marktangebot für Softwarelösungen im Bereich der DF überwiegend auf den Bedarf großer Unternehmen zugeschnitten. Angebotene Lösungen für KMU basieren so zumeist auf den Standardversionen der großen Unternehmen (Eckert 2006).

Ergänzend bieten unterschiedliche Hersteller Softwarelösungen für einzelne Unternehmensbereiche an. Dabei ist jedoch die Integrationsfähigkeit dieser Werkzeuge in das bestehende Gesamtsystem zu beachten (Dettmering et al. 2010). Auch verfügen KMU über eher geringe Personalkapazitäten im Bereich der Planung. Planungsaufgaben sind daher häufig in andere Aufgabenbereiche integriert. Dort können sich die MitarbeiterInnen aufgrund ihrer hohen operativen Belastung nicht im wünschenswerten Umfang mit dem Thema beschäftigen. Die Qualifikation und Beschäftigung spezialisierter Fachkräfte für die DF ist darüber hinaus kostenintensiv und für KMU daher (noch) nicht immer wirtschaftlich. Weiterhin stellt die erstmalige Softwareanschaffung insbesondere für KMU eine hohe finanzielle Belastung dar. Aufgrund der stark differierenden Anforderungen zwischen kleinen, mittleren und großen Unternehmen gilt es, ein jeweils angepasstes Vorgehensmodell zu wählen (vgl. auch Runde 2009).

Auswahl geeigneter Methoden und Werkzeuge

Insbesondere durch die im Vergleich zu großen Unternehmen beschränkten finanziellen Ressourcen bei KMU bedarf es einer sorgfältigen Auswahl geeigneter Methoden und Werkzeuge. Ein Konzept zur Skalierung der DF

(Zäh und Schack 2006) beschreibt die Auswahl und den Detaillierungsgrad geeigneter Werkzeuge für den jeweiligen Anwendungsfall.

Starr vernetzte Softwarelösungen lassen sich nach Schuh et al. (2008) meist nur aufwendig erweitern und ändern. Deshalb hat er einen Ansatz zur flexiblen Vernetzung für konfigurierbare Planungsprozesse entwickelt, der insbesondere die individuelle Planung mit heterogenen Systemen unterstützt.

Projektbezogene Einführung

Die oben genannten Rahmenbedingungen für KMU führen zunächst zu erhöhten Kosten. Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik sind entsprechend des unternehmensindividuellen Bedarfs im Rahmen von aktuellen Projekten nach und nach zu implementieren, um Erfahrungen zu sammeln und möglichst kurze Amortisationszeiten dieser Investitionen zu erreichen (Bracht et al. 2008d).

Externe Unterstützung

Wenn im eigenen Hause keine Erfahrung zum Thema „Digitale Fabrik“ besteht, ist es ratsam, bei Projekten auf das Wissen von externen Beratern zurückzugreifen. Es gibt eine Vielzahl von Hochschuleinrichtungen, Ingenieurbüros und Unternehmensberatungen, die sich inzwischen auf dieses Themenfeld spezialisiert haben. Neben dem Fachwissen zum Thema DF bieten viele Beratungsunternehmen auch die Nutzung moderner Simulations- und Visualisierungswerkzeuge oder kollaborativer Planungsarbeitsplätze wie einen Planungstisch oder eine VR-Großprojektionsanlage an. Mittel- und langfristig sollten allerdings auch KMU eigene Kompetenzen im Bereich DF aufbauen.

Eine Zukunftsstudie des Virtual Dimension Centers (VDC 2016) zeigt insbesondere KMU Visionen und Szenarien zum Einsatz von 3D-Technologien für das Jahr 2025 auf.

6.2.3 Einführung der Digitalen Fabrik in einen Konzern

Die Einführung der DF in einem Konzern erfolgt im Wesentlichen in denselben Phasen wie bei einem KMU, nur in einem größeren Maßstab, und ist wesentlich komplexer. Auch hier beginnt die Projektvorbereitung mit einer Definition der Ziele und möglicher Lösungen. Das eigentliche Projekt besteht aus der Konzeptphase, in der die Einführung geplant wird, sowie der nachfolgenden Umsetzung.

Da in größeren Konzernen ein sehr breites Produktspektrum und vielfältige Verflechtungen im Unternehmen sowie zu Kunden und Lieferanten bestehen, kommen zahlreiche Methoden und Werkzeuge der DF zum Einsatz. Diese unterschiedlichen Werkzeuge benötigen differierende Einführungszeiträume, so dass die Phasen fließend ineinander übergehen. Während sich einige Werkzeug noch in der Erprobung befinden, können andere Werkzeuge schon in der produktiven Nutzung sein. Diese unterschiedlichen Reifegrade der IT-Umsetzungen während der Einführung zu steuern, Synergien zwischen den verschiedenen Teams zu gewinnen und Querschnittsfunktionen für alle gemeinsam aufzubauen, sind die besonderen Herausforderungen an die Projektleitung während der Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF in einem Konzern (vgl. auch Riegmann et al. 2011).

Vorbereitungsphase

Die Vorbereitungsphase besteht in der Festlegung der inhaltlichen, wirtschaftlichen, und zeitlichen Ziele des Projektes mit den Nutzern. Es folgt die Ist-Aufnahme der bereits vorhandenen Elemente, die Planung weiterer Anwendungsgebiete sowie die frühzeitige Aufstellung des Projektteams.

Welche der vielfältigen Methoden und Werkzeuge der DF für ein einzelnes Unternehmen einsetzbar sind, ergibt eine technische Vorklärung. In diesem Schritt informiert sich das Projektteam anhand von Literatur, bei Messen oder Kongressen, mittels Kontakten zu Referenzunternehmen, Forschungsinstitutionen oder durch externe Berater über die in Frage kommenden Werkzeuge und deren Möglichkeiten.

Der wirtschaftliche Nutzen des Einsatzes der DF lässt sich in einem ersten Schritt anhand einer Überschlagsrechnung ableiten. Aus dem Geschäftsbericht eines Unternehmens gehen die jährlichen Investitionen sowie z. B. die Aufwendungen für Personal, Betrieb und Logistik hervor. Eine Übersicht der zu betrachtenden Umfänge sowie Mittelwerte für die Einsparungen gibt Abschnitt 3.5. Die möglichen Kosteneinsparungen sind in den Einzelwerten an die Besonderheiten des jeweiligen Unternehmens anzupassen. Gegen diese Soll-Zahlen werden die Beschaffungs- und Betriebskosten der Methoden und Werkzeuge der DF gerechnet. Berücksichtigt man die durchschnittliche Projektdauer von Planungsvorhaben bei der Festlegung der Amortisationszeit, so gelangt man zu einer Obergrenze für den maximalen Aufwand, unter dem die Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF wirtschaftlich ist.

Die so ermittelten Grenzen können bei fortschreitender Planung des DF-Einsatzes weiter detailliert werden, indem man z. B. aus Erfahrungen in

Pilotprojekten eigene Kennwerte ermittelt, um so zu einer fundierten wirtschaftlichen Aussage zu gelangen.

Ein weiterer Bestandteil der Zieldefinition sind die nicht quantifizierbaren Ziele. Hierzu zählen u. a. die bessere Umsetzung von Standards bei der Planung neuer Fertigungen, die Erhöhung der Prozessstabilität oder eine verbesserte Erreichung strategischer Ziele, wie beispielsweise die Umsetzung einer flexibleren oder mobileren Fertigung. Diese nicht quantifizierbaren Ziele ergeben weitere Argumente zur Begründung der Einführung der DF, insbesondere dann, wenn sie in Abstimmung mit den Interessengruppen wie Planungsleitern oder Werkleitern zu einem in sich schlüssigen Anforderungsprofil zusammengefasst werden.

Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht über die wesentlichen Nutzenfaktoren der DF, die bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung mit unternehmensspezifischen Gewichtungen herangezogen werden können (vgl. auch Abb. 3.15).

Tabelle 6.1 Nutzenabschätzung im Rahmen der Einführung von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik

Zielfaktoren	Veränderung	Detaillierung
Fertigungszeiten senken		EHPV (Engineered Hours per Vehicle), Fertigungszeiten, Logistikzeiten, Prüfzeiten, Rüstzeiten, Wartungszeiten
Investitionen	senken	Betriebsmittel, Gebäude, Technische Gebäudeausrüstung (TGA)
Anlaufkosten	senken	Erprobungskosten, Änderungen, Sonderschichten
Gemeinkosten	senken	z. B. Lagerhaltungskosten für Ersatzteile
Qualität	verbessern	Produktqualität (Kosten, Wartung, Steifigkeit...) Prozessqualität (Stabilität, Taktausgleich) Ressourcenqualität (Flexibilität, Mobilität)
Termine	vorziehen	Meilenstein: Herstellbarkeit des Produktes Meilenstein: Beschaffungsfreigabe der Ressourcen Time to Market

Eine grobe Terminplanung rundet die Zieldefinition ab. Darüber hinaus ist es zur internen Kommunikation bewährte Praxis, Termine und Ziele in wenigen markanten Sätzen zusammenzufassen, wie zum Beispiel die Formulierung: "Die digitale Abnahme wird ab dem Jahr x jede neue Fertigung absichern", oder "Bis zum Jahr x werden alle Fertigungsflächen als Digitales Modell abgebildet sein."

Konzeptphase

Auf Basis dieser Ziele wird das vollständige Projektteam gegründet, das die Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF planen, abstimmen und umsetzen soll. Das Einführungsprojekt für die DF umfasst sämtliche Planungsbereiche und führt nicht nur zur Anschaffung neuer IT-Werkzeuge, sondern auch zu Veränderungen in den Planungsprozessen und -methoden. Daher setzt sich der Steuerkreis des Projektes aus der Produktionsleitung, der Planungsleitung und der IT-Leitung des Konzerns zusammen. Dieses Gremium auf Management-Ebene trifft die strategischen Entscheidungen im Projektverlauf und gibt die erforderlichen Personalkapazitäten und Finanzen frei.

In Abbildung 6.3 sind die Matrixelemente des Projektteams zur Einführung der Methoden und Werkzeuge der DF in einem Konzern, der mehrere Produktmarken anbietet, aufgezeigt.

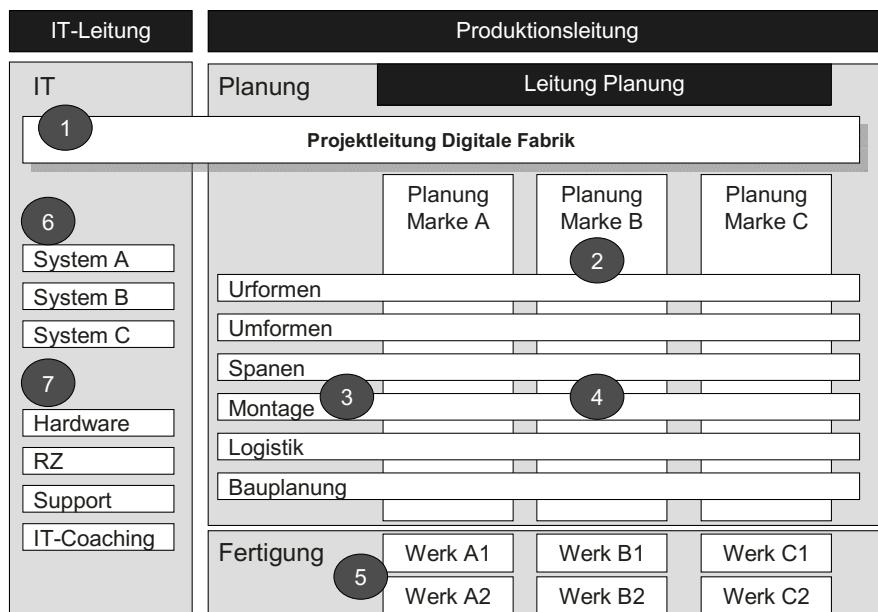


Abb. 6.3 Matrix-Projektorganisation zur Einführung der Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik in einem Konzern

Im Folgenden werden die einzelnen mit den Nummern 1-7 versehenen Bereiche erläutert.

- Projektleitung (1)
Die Leitung des Einführungsprojektes untersteht sowohl direkt der Planungsleitung als auch der IT-Leitung des Konzerns. Bewährt hat sich ein Steuerkreis des Projektes, der aus dem Planungs- und IT-Top Management besteht. Die operative Projektleitung übernimmt eine Doppelspitze aus einer Führungskraft der Planung sowie einem Partner aus der IT des Unternehmens.
- Projektteams einer Marke (2)
Die Projektteams der einzelnen Marken eines Konzerns koordinieren alle Aktivitäten zur DF-Einführung innerhalb dieser Marke. Dazu gehört die Planung der Anwenderzahlen, die Termin- und Finanzplanung sowie die Aufnahme und Pflege markenspezifischer Daten, Bibliotheken und Schnittstellen. Auch die Projektleitung eines Markenteams kann als Doppelspitze aus einem Planer und einem IT-Vertreter der Marken gebildet werden. Die ProjektmitarbeiterInnen sind Key-User und Fachleute zu einzelnen Spezialthemen der DF.
- Fachteams (3)
Um innerhalb des Konzerns möglichst hohe Synergien zu erzielen, werden für die einzelnen Fertigungsgewerke wie Umformen, Spanen oder Montage markenübergreifende Fachteams gebildet. Diese setzen sich aus Spezialisten aller Marken sowie den IT-Vertretern für die Softwaresysteme zusammen. Die Fachteams vereinbaren die Softwareanforderungen, Datenmodelle und Bibliotheken der Anwendungen und definieren das Schulungskonzept. Ihnen obliegen die Softwareabnahmen sowie die Einführung bei Neuentwicklungen.
- Key-User und Fachbereichsspezialisten (4)
Diese Softwaresystemanwender übernehmen die eigentliche Aufgabe der Systemeinführung innerhalb ihres Fachbereichs. Sie sind die zentralen Ansprechpartner der Anwender in ihrem direkten Arbeitsumfeld. Innerhalb der Projektteams der Marke vertreten die Key-User und Fachbereichsspezialisten die Interessen des Fachbereichs, im Fachbereichsteam die der Marke.
- Projektleitung innerhalb eines Werkes (5)
Um zu einer flächendeckenden Umsetzung der DF zu kommen, wird an jedem Fertigungsstandort ein Projektteam gegründet, welches die Konzernlösungen der DF vor Ort zum Einsatz bringt. Dort wird die Einsatz-, Finanz- und Terminplanung des Werkes vorgenommen. Vertreter der Werke können sowohl im Fach- als auch im Markenteam vertreten sein.
- IT-Systemverantwortliche (6)
Die IT-Systemverantwortlichen koordinieren die Aufgaben der IT bei der Softwaresystemeinführung. Diese sind in verschiedenen Konzernen

unterschiedlich geregelt. Üblicherweise gehören dazu die Beschaffung von Hard- und Software, Erstellung der Ausschreibungen und Beauftragung von Modifikationen, Eigenentwicklungen und Schnittstellen. Die Systemverantwortlichen gewährleisten auch die Einhaltung konzerninterner IT-Standards sowie die technische Abnahme von Neuentwicklungen.

- **IT-Querschnittsaufgaben (7)**

Neben den Verantwortlichen für die einzelnen Softwaresysteme komplettieren je nach Organisation gegebenenfalls weitere Spezialisten für Querschnittsaufgaben das Team. Dies können die MitarbeiterInnen der Hardwareplanung, der Rechenzentren, des Anwendersupports und des Coaching für IT-Anwendungen, aber auch Technologie- oder Datenbankspezialisten sein.

Damit alle Teams an einer gemeinsamen Lösung arbeiten, sind eine intensive Kommunikation und eine klare Entscheidungsstruktur essentiell. Bei einem weltweit agierenden Unternehmen eignet sich dieses Gesamtteam in besonderem Maße auch dazu, neue Techniken der Projekt-kommunikation sowie der virtuellen Zusammenarbeit zu erproben. Dazu zählen Videokonferenzen, virtuelle Projekträume, vernetzte Terminpläne oder Wissensmanagement. In den Teams werden beispielsweise bei der Volkswagen AG daher zum einen Pioniere der IT-Technik und zum anderen zentrale Key-User innerhalb des Geschäftsbereichs der Produktion eingesetzt. Dies sind MitarbeiterInnen, die besonders prädestiniert sind, neue Methoden und Techniken als Multiplikatoren in den gesamten Konzern zu tragen.

Die inhaltliche Arbeit des Projektes wird von den Fachteams geleistet. Um ihre Arbeit zu strukturieren und auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen, nutzen sie als Zentraldokument eine Liste der planerischen Handlungsfelder. In Tabelle 6.2 ist beispielhaft ein Ausschnitt der planerischen Handlungsfelder eines Fachteams im Gewerk Umformen dargestellt. Sie enthält eine Detaillierung dieser Aufgaben und schafft so eine einheitliche Sprachregelung zwischen den verschiedenen Konzernmarken. Diese Festlegungen und das gemeinsame Verständnis sind wesentliche Schritte für die weitere erfolgreiche Projektarbeit. So mag z. B. in einer Marke des Konzerns der Begriff Prozessplan nur die maschinellen Anteile eines Fertigungsprozesses beschreiben, während er in einer anderen Marke der Oberbegriff für alle Arbeitsschritte ist und in einer dritten Marke gar nicht benutzt wird; dort wird hingegen die gesamte Informationsart als Arbeitsplan bezeichnet. Bei internationalen Projekten kommt dieser einheitlichen Begriffsdefinition eine noch bedeutendere Rolle zu.

Tabelle 6.2 Planerische Handlungsfelder eines Fachteams im Gewerk Umformen (Ausschnitt)

Handlungsfeld	Beschreibung	Methode/ Werkzeug
Bewertung der Produktdaten	Visuelle Prüfung	CAD-Viewer
	Prüfung der Radien oder Winkel	
	Analyse eines FEM-Netzes	FEM
Entwurf Presswerkzeug	Prüfung der Netzdichte und Brüche	
	Entwicklung der Geometrie der Fertigungsstufen	CAD
Prozessplan	Prüfung der Fertigungsgeometrie	Ziehsimulation
	Erfassung des Prozessplans	Arbeitsplansystem
	Bewertung der Ergonomie der Arbeitsplätze	Ergonomiesimulation

Nach der Aufgabendefinition erfolgt die Werkzeugauswahl für das einzelne Handlungsfeld. Sind verschiedene Softwaresysteme für ein und dieselbe Aufgabe im Konzern im Einsatz, obliegt es dem Fachteam, sich auf ein Werkzeug zu einigen. Existiert noch kein entsprechendes Softwaresystem oder sind die eingesetzten nicht hinreichend, erfolgt eine Marktanalyse mit der möglichen Einführung oder Entwicklung eines neuen Softwaresystems.

Auf diese Art entsteht eine Liste, die zu jeder Planungsaufgabe (Was) das dafür festgelegte System (Womit) beinhaltet. Nach diesem Arbeitsschritt organisiert sich die weitere Projektarbeit nach Abbildung 6.4 um die Liste der Handlungsfelder (siehe Tabelle 6.2). Für jedes einzelne Handlungsfeld werden von den IT-Spezialisten die erforderlichen Softwaresysteme technologisch bewertet und in die Systemlandschaft des Unternehmens eingeplant. Eventuelle Änderungsanforderungen werden beschrieben und in Lastenheften zusammengefasst. Nach Vorliegen der Angebote sind Lieferverträge zu verhandeln und die Teilprojekte zur Realisierung von Anpassungen und Schnittstellen zu steuern. Schließlich sind die IT-Werkzeuge abzunehmen und bei den Anwendern einzuführen.

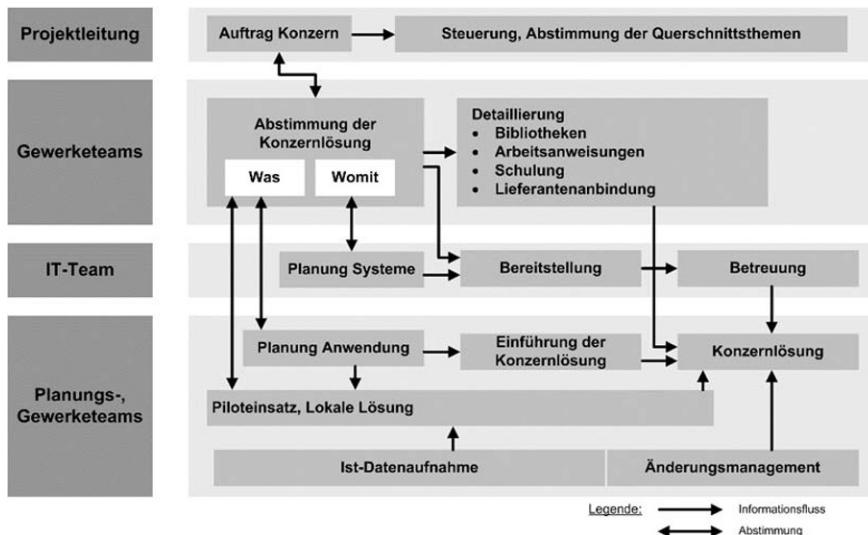


Abb. 6.4 Typischer Ablaufplan zur Umsetzung eines planerischen Handlungsfeldes in einem Konzern

Parallel dazu detailliert das Fachteam die weitere Ausgestaltung, in dem es unternehmensspezifische Bibliotheken der Modellelemente vorbereitet und Arbeitsanweisungen zur Durchführung der Planungsaufgaben definiert. Des Weiteren plant das Fachteam zusammen mit der Ausbildungsabteilung die Schulungsinhalte für die Anwendung, macht Vorgaben für den Anwendersupport zur Beratung der Endnutzer und definiert die Datenformate zur Kommunikation mit den Lieferanten von Planungsdienstleistungen sowie Werkzeugen, Maschinen, Anlagen oder Gebäuden.

Neben diesen zentralen Projektaktivitäten beginnen die verschiedenen Planungsabteilungen und Werke des Konzerns mit der Einführungsplanung. Der erste Schritt dabei ist die Kompetenzplanung (Abb. 6.5).

In diesem Arbeitsschritt wird in enger Abstimmung mit dem Planungsteam festgelegt, welche Kompetenzen in welchem Anwenderbereich zur Nutzung der Methoden und Werkzeuge der DF aufgebaut werden sollen. Dabei wird zunächst gefragt, welcher Anwender welche Planungsaufgabe in welcher Projektphase ausführt. Erfolgt diese Tätigkeit in einer Organisationseinheit nicht, so ist keine weitere Planung erforderlich (*Strich*). Ist die Tätigkeit Bestandteil der Aufgaben der Organisationseinheit, so wird definiert, ob sie diese Aufgabe selbst mit den Werkzeugen und Methoden der DF durchführt (*Eigen*), oder die Aufgabe durch eine Zentralstelle oder einen externen Dienstleister durchführen lässt (*Fremd*). Ein weiterer Fall kann auftreten, wenn die Aufgabe zwar durch eine Fremdfirma ausgeführt

wird, die Organisationseinheit aber in die Lage versetzt werden soll, die Ergebnisse zu prüfen, auszuwerten und die Daten für die spätere Nutzung zu archivieren (*Prüfung*).

Fähigkeit	Zentral Planung Marke A	Werkzeug- bau Marke A	Werk 1	Werk 2
Absicherung von Einzelarbeitsfolgen				
Presswerk: Umformprozess	Eigen	Eigen	-	Fremd
Teiletransport	Eigen	Eigen	-	Fremd
Karosseriebau Fügeprozess	Eigen	Eigen	Eigen	Prüfung
Fabrik-DMU (Kollisionen, Normen)	Eigen	-	Prüfung	Eigen
Ablaufsimulation der Fabrik	Eigen	-	Eigen	Eigen
Virtuelle Inbetriebnahme	-	Eigen	Fremd	Prüfung
Änderungsmanagement in der Digitalen Fabrik	Eigen	Eigen	Eigen	Eigen

Abb. 6.5 Kompetenzplanung der Nutzerbereiche der DF

Die Kompetenzplanung ist von strategischen und wirtschaftlichen unternehmensinternen Entscheidungen abhängig. Zum einen muss erwogen werden, ob die Aufgabenstellung so häufig durchgeführt wird, dass sich der Aufbau von eigenem Know-how und die Einrichtung sowie der Betrieb der erforderlichen Hard- und Software lohnen. Immer stärker werden hier Cloudlösungen erwogen. Zum anderen muss in der Organisationseinheit die entsprechende Tätigkeit so häufig durchgeführt werden, dass die Anwender das gelernte Fachwissen auch hinreichend häufig anwenden, vertiefen und präsent halten können. Weiterhin ist zu klären, ob die Tätigkeit verteilt in allen Werken durchgeführt werden soll oder ob der Aufbau einer Zentralstelle effizienter ist. Der Vorteil von Zentralstellen ist, dass dort mehrere Spezialisten zum gleichen Thema arbeiten, sich fachlich gegenseitig unterstützen und in Abwesenheitsfällen vertreten können. Der Nachteil ist die größere Distanz zu den Fachabteilungen, zu den Datenquellen und Aufgabenstellungen vor Ort. Eine Mischvariante sind Anwender vor Ort, die auf das Fachwissen und die Personalkapazitäten einer Zentralstelle zurückgreifen können.

Auf Basis dieser Kompetenzplanung der nutzenden Unternehmensbereiche und Werke sowie den Beschreibungen der Handlungsfelder aus den Fachteams erfolgt die weitere Einführungsplanung in den Organisationseinheiten. Im Mengengerüst sind die geplanten Anwenderzahlen, der Schulungsbedarf, die notwendige Hardware und die Softwarelizenzausstattung, gegebenenfalls die Einrichtung von VR-Labors und anderen Spezial-

einrichtungen zu planen. Aufbauend auf diesen Informationen erfolgt die Klärung, Abstimmung und Freigabe des Finanzbedarfs für die Umsetzung sowie die Beauftragung und Einführung der Anwendungen.

Nutzt die betroffene Organisation bereits lokale Softwarelösungen, die von der zukünftigen Konzernlösung abweichen, so ist eine Ablösung wirtschaftlich zu bewerten und gegebenenfalls eine Migration zu planen und durchzuführen.

Um nach Einführung der Konzernlösung die IT-Werkzeuge möglichst umgehend nutzen zu können, ist gegebenenfalls eine Aufbereitung von spezifischen Daten erforderlich. Hierzu gehören u. a. die 3D-Modellierung der vorhandenen Hallen, Maschinen und Anlagen, die in späteren Simulationen genutzt werden sollen, sowie die Aufnahme von Grundparametern für Logistik-, Fertigungs- und Ergonomiesimulation- oder auch materialspezifische Simulationen.

Eine weitere mögliche Lösung zur Verbesserung der verteilten Planungen an voneinander weit entfernten Orten ist ein so genannter Remoteplanner (Bracht und Abel 2002). Auf der Basis von Internet und VR kann so eine weltweit vernetzte, interaktive Fabrik- und Anlagenplanung ermöglicht werden. Die Akteure arbeiten gemeinsam an einem virtuellen Anlagenmodell und können bedarfsoorientiert Arbeitsgrundlagen, Änderungen und Ergebnisse sofort austauschen.

Umsetzungsphase

Während der Umsetzungsphase wird die ausgewählte Software eingeführt, die Anwender werden geschult und ein Probetrieb in Pilotprojekten durchgeführt sowie Schnittstellen und Softwareanpassungen eingerichtet. Der Anwendersupport nimmt den Betrieb auf, und die Finanzplanung wird von Projektgeldern auf geplante Budgets umgestellt. Diese Aktivitäten zur Einführung von Methoden und Werkzeugen zur DF unterscheiden sich nur wenig von denen anderer Softwareeinführungen.

Eine Besonderheit ist jedoch der oben bereits erwähnte notwendige Aufbau einer geeigneten Organisation für die Anwendung der Methoden und Werkzeuge der DF. Der folgende Abschnitt beschreibt hierzu neue Formen der Aufbauorganisation und der Zusammenarbeit zwischen Plännern, Meistern und Werkern (vgl. auch Reinhart et al.2008).

6.3 Ein neuer organisatorischer Ansatz zur DF

Am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) der TU Clausthal wurde ein neuer organisatorischer Ansatz für Produktionsunternehmen der variantenreichen Großserienfertigung entwickelt. Insbesondere soll dadurch der PEP im Zusammenhang mit den Potenzialen der DF verbessert und ein grundsätzlicher Diskussionsbeitrag zur Weiterentwicklung von Aufbauorganisationen geliefert werden.

6.3.1 Anforderungen an die neue Organisationsstruktur

Der Hauptansatz zur Entwicklung eines neuen Organisationskonzeptes ist nach Masurat (2006) die Orientierung an der Abfolge der verschiedenen Planungsphasen im Produktentstehungsprozess. Für die Bearbeitung der Aufgaben in diesen Phasen ist es sinnvoll, ohne Einschränkung durch eine starre Aufbauorganisation (Abteilungen) bedarfsorientiert und flexibel Teams zusammenstellen zu können, die sich anforderungsspezifisch aus Spezialisten und Generalisten zusammensetzen. Da sich im Verlauf eines Projektes unterschiedliche Aufgabenstellungen ergeben, sollten entsprechende Teams mittels eines dynamischen Ressourcenmanagements immer wieder neu gebildet, angepasst und aufgelöst werden können, so dass jeweils eine optimale Zielerreichung bei der Bewältigung gewährleistet ist.

Damit sich das zuständige Personal in Form eines Selbstmanagements entfalten kann, ist es wichtig, die Anzahl der parallel zu bearbeitenden Projekte überschaubar zu halten. Daraus folgt, dass Teammitglieder nur so lange wie unbedingt nötig in ein und demselben Projekt zu binden sind.

Grundsätzlich sind in der neuen Organisationsstruktur die Anzahl der Ebenen nach Möglichkeit zu minimieren und besonders der Anteil an administrativen Organisationseinheiten gering zu halten. Dennoch muss eine zentrale Verantwortlichkeit erhalten bleiben, um strategisch wirksame Entscheidungen treffen zu können.

Um die angemessene Prozessorientierung zu gewährleisten, muss die Organisationsstruktur so ausgelegt sein, dass eine Integration von Aufbau- und Ablauforganisation verwirklicht wird. Alle Abläufe und Prozesse in der Produktentwicklung, der Planung der dazugehörigen Produktion und deren Inbetriebnahme werden dabei in Form von Projekten abgewickelt.

Die Basis für das neue Gesamtkonzept einer Organisationsstruktur wird durch ein System zur phasenflexiblen, bedarfsorientierten Teambildung und durch die Orientierung an einem neu definierten Referenzmodell für den Produktentstehungsprozess gebildet (Masurat 2006).

6.3.2 Alternierendes Mehrstufiges Projektteam (AMP)

Das unter dem Namen AMP (AMP – Alternierendes Mehrstufiges Projektteam) konzipierte Modell hat einen besonderen Einfluss auf die Verwaltung und Verbreitung relevanter Informationen im Projektverlauf und verteilt die Aufgaben des Projektes auf drei sich gegenseitig beeinflussende Teams. Hauptsächlich wird der Informationsfluss geregelt und ein wesentlicher Beitrag bei der Terminierung von Projektzeiten und der Partizipation von Mitarbeitern des Unternehmens geleistet (Abb. 6.6).

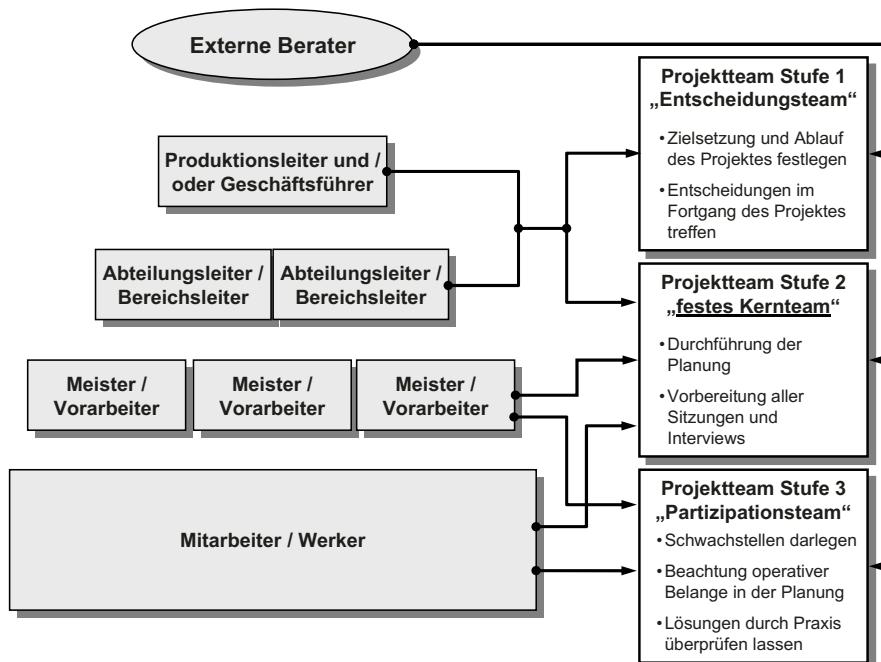


Abb. 6.6 Alternierendes Mehrstufiges Projektteam (AMP) mit Einbindung externer Berater

In der ersten Stufe des AMP befindet sich das so genannte Entscheidungsteam. Die Mitglieder hierfür rekrutieren sich aus den oberen Stufen der Unternehmenshierarchie und sind verantwortlich für die strategische Planung des Projektes. Dies bedeutet, dass hier die grundsätzlichen Ziele, Budgets und Termine geplant und der generelle Projektablauf festgelegt werden. In diesem Sinne hat das Team besonders vor dem eigentlichen Start und zu Beginn des Projektes die Hauptbelastung zu tragen. Dennoch muss dem Entscheidungsteam in festgelegten Zyklen Bericht über den Pro-

pektstand erstattet werden. Da aber im Verlauf des Projektes unweigerlich weitere und grundsätzliche Entscheidungen zu treffen sind, wird dieses Team je nach Bedarf einbezogen.

Das Projektteam der Stufe 2 bildet das Kernteam in einem Projekt. In dieser Stufe befinden sich alle Beteiligten, die ständig für das Projekt zur Verfügung stehen müssen. Dem Kernteam obliegt es, das Projekt zu planen, zu steuern und zu überwachen. Dabei werden die wichtigsten Teilaufgaben zumeist vom Kernteam selbst bearbeitet bzw. die Bearbeitung von Arbeitspaketen koordiniert und die Zielerreichung überwacht.

Die dritte Stufe des AMP wird durch das Partizipationsteam gebildet. Vornehmlich werden hier die Mitarbeiter aus den operativen Ebenen des Unternehmens an dem Projekt beteiligt. Mit Hilfe dieses Teams wird es möglich, wichtige Belange der operativen Bereiche in den Projekten zu berücksichtigen und Problemlösungen in der Praxis überprüfen zu lassen. Dies geschieht sowohl zeitlich als auch bezüglich der Zusammensetzung flexibel, je nach Projektbedarf.

6.3.3 Referenzmodell des Produktentstehungsprozesses

Für das folgende Referenzmodell des PEP (siehe Abb. 6.7) wurde zur Betonung der Integrations- und Zyklusaspekte eine Kreisdarstellung gewählt (vgl. Abb. 2.1).

In den Kreissektoren sind die Einzelphasen aufgeführt, die das Produkt in seinem Lebenszyklus durchläuft. Diese sind hier zwar sequenziell dargestellt, der tatsächlich anzustrebende zeitliche Verlauf der Einzelphasen orientiert sich jedoch integrativ an den in den Ringabschnitten wiedergegebenen Hauptphasen.

Der Start beginnt mit der ersten, grundlegenden Einzelphase (Marketing, Produktplanung). Hier gilt es, die anvisierten Vertriebs-, Produktionsprogramm- und Materialbedarfsmengen sowie den Sekundärbedarf in entsprechender Qualität dem planenden Bereich zur Verfügung zu stellen (Bracht et al. 2007b). In der gesamten folgenden Supply Chain werden auf Basis dieser Informationen wichtige Entscheidungen in der Fabrik- und Produktionsplanung getroffen. Liegen nur ungenaue oder inkonsistente Sekundärbedarfsprognosen für Teile und Komponenten vor, führt dies häufig zu einer Kaskade fehlerhafter Planungen, zum Beispiel für die Kapazität und notwendige Flexibilität von Produktionseinrichtungen in der Automobilindustrie.

Hier hat Stäblein (2008) mit seiner Dissertation eine neuartige richtungweisende Gesamtmethodik zur integrierten Materialbedarfsplanung

auf Basis von Intervallschranken entworfen, die von Kappler et al. (2010) weiterentwickelt wurde.

Nach der Ermittlung der Marktanforderungen und der grundsätzlichen Produkt- und Teilebedarfe, werden in der Folgephase die grundlegenden Konzepte für das Produkt entwickelt. Zusammen mit den Phasen Entwurf und Ausarbeitung bilden sie die erste Hauptphase *Entwicklung und Konstruktion*. Die weiteren Teilphasen Prozess-, Fertigungs- und Montageplanung sowie Anlagen-, Logistik- und Fabrikplanung bilden den Kern der zweiten Hauptphase *Produktionsentstehung*. Bereits zu einem recht frühen Zeitpunkt in der Entwicklung und Konstruktion soll jedoch verstärkt mithilfe der DF eine weitergehende simultane Bearbeitung der Phasen stattfinden. Dabei muss aber mit einer höheren Anzahl an Iterationsschleifen gerechnet werden, da die Planung zu einem frühen Zeitpunkt noch nicht auf gesicherte Daten zurückgreifen kann.

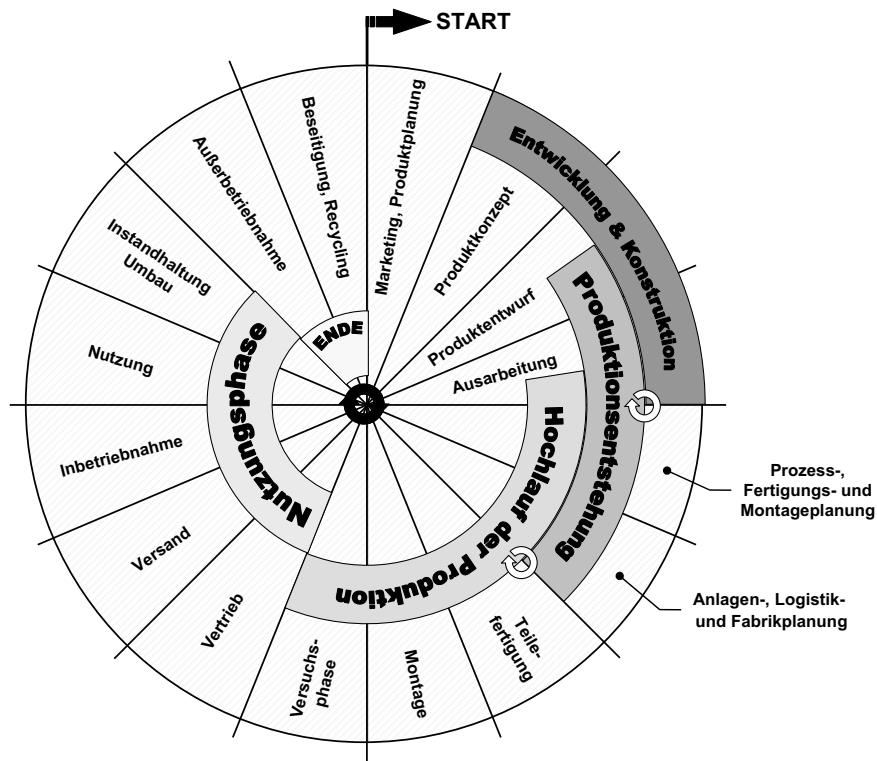


Abb. 6.7 Referenzmodell für den Produktentstehungsprozess PEP

Die von der Vorbereitung des Produktionsbeginns bis hin zum Erreichen der Soll-Stückzahl notwendigen Schritte werden in der Hauptphase *Hochlauf der Produktion* zusammengefasst. Auch hier ist eine zeitliche Überlappung mit den vorhergehenden Hauptphasen im Sinne einer Verkürzung des Hochlaufs beabsichtigt. Iterationsschleifen sind daher nicht zu vermeiden.

Die genannten drei Hauptphasen werden insbesondere bei der Gestaltung der neuen Organisationsstrukturen berücksichtigt (weitere Ausführungen vgl. Masurat 2006).

6.3.4 Grundmodell der neuen Organisationsstruktur

Das Konzept der neuen Gesamtstruktur für eine Aufbauorganisation ist in Abb. 6.8 dargestellt.

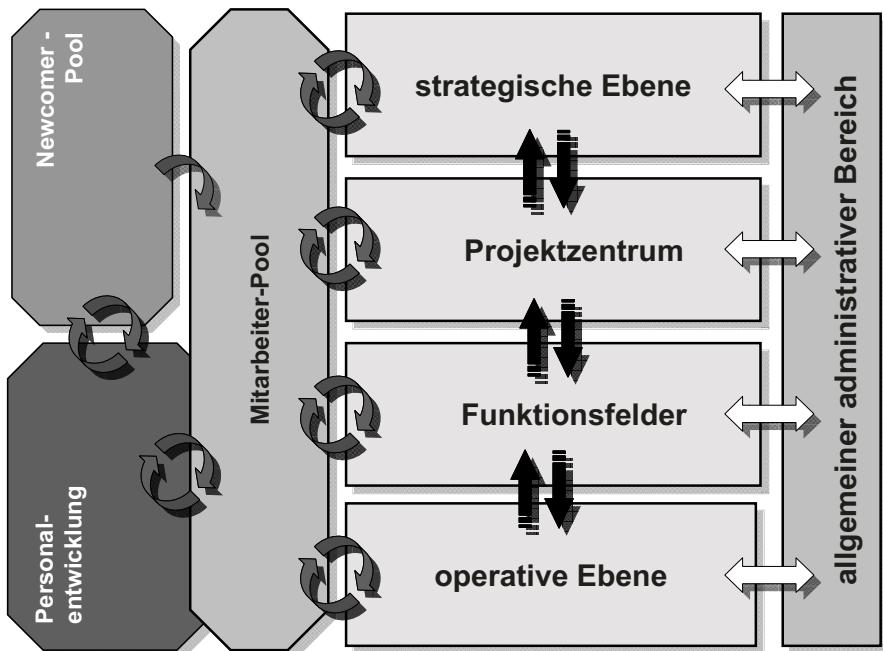


Abb. 6.8 Gesamtstruktur der neuen Aufbauorganisation (Masurat 2006)

Das Konzept erlaubt einen fließenden Übergang von den Planungen im Projektzentrum zur operativen Ebene im Unternehmen und soll so die Belange der Produktion berücksichtigen und einen integrierten, schnellen

Produktionsanlauf bis zur geplanten Soll-Stückzahl ermöglichen. Dabei werden zur Bearbeitung von Projekten weitestgehend autarke Kerntteams, Fachgruppen und dazugehörige Subteams bedarfsorientiert gebildet und wieder aufgelöst. Eine Grundadministration muss aber weiterhin gewährleistet sein, feste Abteilungen gibt es im ursprünglichen Sinne allerdings nicht mehr. Somit werden Aufgaben nicht einzelnen Unternehmenseinheiten zugewiesen, sondern Arbeitspakete werden so ausgelegt, dass die zur Erfüllung notwendigen Funktionen definiert und geeignete Mitarbeiter zur Bearbeitung bestimmt werden können.

6.3.5 Embedded Planning

Durch die Kombination der neuen Aufbauorganisation mit dem Konzept der Alternierenden Mehrstufigen Projektteams entsteht das Gesamtkonzept einer neuen Projektorganisation. Da die planenden Aufgaben der Produktionsentstehung das Bindeglied zwischen Entwicklung und Produktion bilden, wird von einer eingebetteten Planung (analog zu den bekannten „Embedded Systems“) gesprochen (Abb. 6.9).

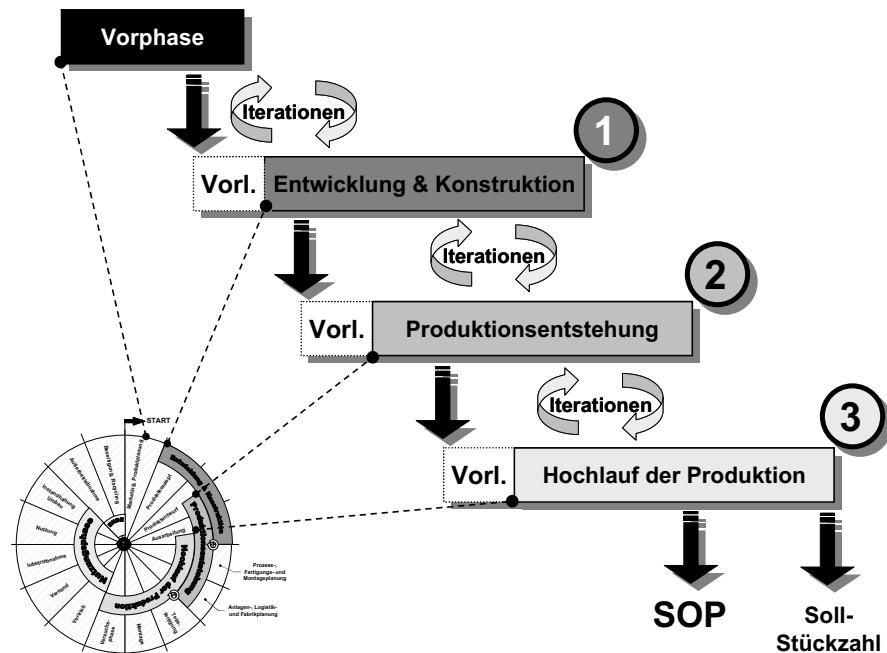


Abb. 6.9 Phasenfolge im Embedded Planning (Masurat 2006) (vgl. auch Abb. 6.7)

Die Vorphase umfasst zunächst die grundsätzlichen Schritte zu Beginn eines Projektes. Unter anderem wird dabei das Kernteam gebildet.

Zum Start jeder der Hauptphasen 1 bis 3 werden in einem Vorlauf jeweils die notwendigen Funktionen bestimmt, die zur Erfüllung der in der Phase gestellten Aufgaben notwendig sind und entsprechende MitarbeiterInnen aus dem Mitarbeiter-Pool ausgewählt. Diese werden je nach Anforderungen in interdisziplinären Fachgruppen und Subteams gebündelt und mit der Bearbeitung von Arbeitspaketen oder Teilaufgaben betraut.

Die zweite Hauptphase (2) kann zu einem Zeitpunkt beginnen, an dem erste Daten aus der Entwicklung und Konstruktion vorliegen. Dabei müssen die von den Entwicklern vorgesehenen Technologien für die Fertigung und Montage des Produktes berücksichtigt werden. Durch den Einsatz digitaler Produkt- und Produktionsprozessmodelle können daraufhin ebenfalls noch auf einem groben Detaillierungslevel erste Anlagen, die verknüpfende Logistik und die Infrastruktur bis hin zur gesamten Fabrik geplant werden. So werden basierend auf den Produktmodellen zusätzliche Modelle der Fertigung, Montage und Logistik in einem digitalen Gesamtmodell der zukünftigen Produktionsstätte bzw. der Fabrik erzeugt.

Wie beim Übergang zwischen der ersten und zweiten Hauptphase besteht auch eine Überlappung zur dritten (*Hochlauf der Produktion*). Auch diese Hauptphase wird durch einen Vorlauf zur Gruppen- und Teambildung eingeleitet. Dazu ist es notwendig, dass erste wesentliche Ergebnisse aus der Hauptphase der Produktionsentstehung vorliegen, die mit der Produktentwicklung bereits abgestimmt sind.

Im Zuge der Anpassungen in allen Phasen eines Projektes kommt es zu einer Vielzahl von Versionen und Varianten der Konstruktion und Produktion. Dies kann dazu führen, dass durch ständiges Weiterentwickeln und Verbessern nachfolgende Arbeitspakete angepasst werden müssen. Um eine Verselbstständigung der Prozesse zu vermeiden und die zeitliche und kostenmäßige Zielerreichung sicherzustellen, werden sogenannte Freeze-Points definiert, an denen bestimmte Entwicklungs- und Planungsstände festgeschrieben werden, die danach nicht mehr verändert werden dürfen.

Dazu hat sich die Einführung von sogenannten Gates oder Meilensteinen als hilfreich erwiesen. Dabei werden zum Ende von Einzelphasen Gates angeordnet, in denen nach Bearbeitung zusammenhängender Arbeitspakete die Erreichung aller Ziele überprüft wird. Erst danach können die davon abhängigen Folgeschritte im Projekt weitergeführt werden. Auf diese Weise werden Entwicklungs- und Planungsstände zu definierten Zeitpunkten eingefroren. Das bedeutet für Folgeschritte, dass die Daten dieser Phasen nach Passieren der Gates festgelegt sind. Darauf aufbauend können die schon begonnenen Arbeiten der folgenden Phase mit gesicherten Daten fortgesetzt werden oder es erfolgt eine Anpassung bisheriger Ergebnisse.

Obwohl dieses Vorgehen eine Absicherung des Produktentstehungsprozesses bedeutet, sind Rücksprünge nicht immer zu vermeiden, da es häufig Gründe gibt – z. B. unerwartete neue Marktanforderungen –, die eine komplette Modifikation einzelner Entwicklungs- und Planungsschritte notwendig machen.

6.3.6 Anwendungsbeispiel des neuen Konzeptes

Die Faktoren, welche die Produktgestaltung und damit auch die Konstruktionsprozesse beeinflussen, sind vielfältig und können wirtschaftliche sowie technische Gründe haben. Besonders gilt dies für die Einführung neuer, noch nicht industriell erprobter Fertigungstechnologien. Eine Beurteilung, ob die Entscheidung für ein neues Fertigungsverfahren positiv oder negativ ausfällt, kann zumeist erst nach der Umsetzung in einer realen Produktion erfolgen. Da aber die starke Überlappung der Hauptphasen im vorgestellten Referenzmodell des Produktentstehungsprozesses dazu führt, bereits in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung eine Entscheidung treffen zu müssen, greifen Konstrukteure und Fertigungsplaner lieber auf bekannte und beherrschte Verfahren zurück, da die Risiken wesentlich besser abzuwägen sind.

Um eine qualitative Abschätzung vornehmen zu können, wie gut eine neue Fertigungstechnologie im Vergleich zu einer etablierten ist, sind Simulationsmodelle hilfreich. Durch eine Zusammenführung geeigneter Methoden und Modelle in einem detaillierten, realitätsnahen und experimentierfähigen virtuellen Gesamtmodell, dem sogenannten Digitalen Prozessmuster (vgl. Abschnitt 2.2.1), können Alternativen für Fertigungsverfahren schon frühzeitig gegeneinander abgewogen werden.

Eine erste Erprobung der interdisziplinären Zusammenarbeit in phasenflexiblen Teams fand im Rahmen von Forschungsarbeiten zum Verfahren des Hochfrequenzschweißens statt. Zur Entwicklung des Digitalen Prozessmusters wurde ein Team aus MitarbeiterInnen dreier verschiedener Forschungsinstitute gebildet. Die Auswahl und Bestimmung der benötigten Fachfunktionen erfolgte auf Basis des Konzeptes des Embedded Planning nach Qualifikationsprofilen.

Ein Experte für das Hochfrequenzschweißen brachte das technologische Know-how des Verfahrens in das Team ein. Von ihm wurde auch der Vorschlag für ein fiktives, aber realitätsnahe Musterbauteil erarbeitet, das komplett in mehreren Schritten von der Blechplatine bis zum Fertigteil in einer einzigen Produktionszelle hergestellt werden sollte. Die primäre Aufgabe eines involvierten Logistiklers lag im Entwurf der Fertigungspro-

zesskette für die Produktionszelle zur Herstellung des Musterbauteils unter materialflusstechnischen Aspekten.

Um die Belange der Handhabung und Auslegung der Anlagen in der Produktionszelle berücksichtigen zu können, wurde ein Produktionstechniker hinzugezogen, der die entsprechenden Anlagenkomponenten und die Konzepte der maschinennahen Abläufe entwarf.

Für die Entwicklung einer geeigneten VR-basierten Kooperations- und Kommunikationsplattform und zur Programmierung notwendiger Softwareapplikationen im Rahmen der Zusammenführung verschiedener Simulationen war ein Informatiker zuständig.

Um die logistischen Aspekte der Produktionszelle untersuchen zu können, lieferte eine Ablaufsimulation entsprechende Ergebnisse. Diese wurden anschließend auf der VR-Plattform mit den Prozesssimulationsen für Maschinen, Anlagen und Roboter zusammengeführt. Auf diese Weise war es möglich, bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium der Technologie des Hochfrequenzschweißens wichtige Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Taktzeiten und Durchsatzmengen zu gewinnen.

Die Erfahrungen aus dem Pilotprojekt lassen sich wie folgt zusammenfassen: Schon bei der Zusammenstellung des Projektteams konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich der Definition von Fachfunktionen gewonnen werden. Die Wichtigkeit der eindeutigen Beschreibung des Qualifikationsprofils wurde belegt. Allerdings zeigte sich, dass aufgrund der übergreifenden Aufgabenstellung einige wesentliche Aufgaben in dem Projekt nur gemeinsam vom Team bearbeitet werden konnten. Dies machte deutlich, dass zwar eine genaue Abgrenzung der Arbeitspakete für jeden Beteiligten notwendig ist, aber eine deutliche Formulierung der Gesamtzielsetzung und die Transparenz der zu bewältigenden Aufgabe gewährleistet werden muss. Nur so ist es möglich, eine enge Verzahnung der verschiedenen Arbeitspakete zu erzielen. In diesem Sinne sind Subteams so zu besetzen, dass sie bezüglich der Mitarbeiteranzahl und der gestellten Gesamtaufgabe überschaubar bleiben.

Ausführliche Erläuterungen zu diesem neuen Organisationsansatz, zur Vorgehensweise, zum Referenzmodell und zu ersten Erfahrungen gibt die Dissertation zu diesem Forschungsprojekt (Masurat 2006). Wesentliche Grundgedanken und Lösungsansätze werden von Reinhart et al. (2008) aufgegriffen und weitergeführt zum Digitalen Unternehmensnetzwerk. Er stellt ebenfalls fest, dass der Einsatz der Werkzeuge der Digitalen Fabrik besser organisiert werden muss, wenn die technischen Möglichkeiten dieser Werkzeuge noch effizienter in der Produktentstehung genutzt werden sollen. Dazu wird beschrieben, wie die Ablauf- und Aufbauorganisation für effiziente interdisziplinäre Projektteams in stark arbeitsteiligen Unter-

nehmen angepasst werden sollen, damit es zu einem vollkommenen projektorientierten Denken und Vorgehen kommt.

6.4 Neue Mitarbeiterrollen und -aufgaben

Mit der umfassenden Nutzung der DF wandeln sich die Aufgaben der MitarbeiterInnen in den betroffenen Planungsabteilungen und unterstützenden Organisationseinheiten. Die anfallenden Aufgaben lassen sich in vier Anwendergruppen unterteilen (Abb. 6.10).

Technologieplanung

- Planung neuer oder veränderter Technologien mit der Digitalen Fabrik
- Vorbereitung der Daten und Systeme für die Anwendung in realen Projekten

Temporär zugeordnete Projektplaner

Projektplanung A

Planung des Projektes A mit den Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik

Projektplanung B

Planung des Projektes B mit den Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik

Operative Projektunterstützung

- Zentrale Spezialfunktionen
- Zentrale Zusammenfassungsaufgaben im Projekt (z.B. Fabrik-DMU)
- Bibliotheken und Standards

IT- und Methoden-Unterstützung

- Koordination der Planungsprozesse
- Koordination der Systementwicklung
- Schulung und Support

Abb. 6.10 Anwendergruppen der DF

- Technologieplanung

Außerhalb der Projekte werden Neuerungen und Innovationen der Fertigungstechnik für den konkreten Einsatz in kommenden realen Projekten vorbereitet. Zu diesen Aufgaben gehören z. B. die Fertigungsplanung neuer Produktkomponenten, Materialien oder Ausführungen, die An-

wendung neuer Fabrik- oder Fertigungskonzepte, die Einführung neuer Fertigungstechnologien, die Verwendung neuer Maschinen und Anlagen-technik, der Einsatz neuer Arbeitsmethoden oder die Anwendung neuer Planungsmethoden.

Die Technologieplanung kann durch die Methoden und Werkzeuge der DF unterstützt werden, indem sie im Zusammenspiel mit konventionellen Methoden die neuen Fertigungstechnologien digital untersucht (siehe Abschnitt 7.6). Für die praktische Anwendung sind die Ergebnisse soweit vorzubereiten, dass sie von den Projektteams – möglichst schon abgesichert – in Form von Bibliothekselementen genutzt werden können.

- Temporär zugeordnete Projektplaner

Die Hauptaufgaben einer Planung bestehen darin, entweder neue Produkte in eine bestehende Fertigung einzuplanen, eine bestehende Fertigung zu erweitern oder zu optimieren oder eine neue Fertigungsstätte aufzubauen. Die daran beteiligten Projektplaner bilden den Kern der Anwender der DF. Von der Aufgabenstellung und von ihrer Ausbildung her sind sie keine Spezialisten für die Anwendung der Methoden und Werkzeuge der DF. Die Methoden und Werkzeuge sind für sie aber ein Hilfsmittel, um möglichst effizient optimale und abgesicherte Planungs-ergebnisse zu erzielen. Diese Anwendergruppe stellt daher hohe Anfor-derungen an die Effizienz der IT-Systeme mit wenigen Medienbrüchen. Sie ist durch einfach zu bedienende Benutzungsschnittstellen, Planungs-assistenten und abgestimmte Workflows besonders gut zu unterstützen.

- Personal zur operativen Projektunterstützung

Zu dieser Anwendergruppe gehören Spezialisten für planerische Son-deraufgaben, die mit ihrem Fachwissen und Spezialsystemen von meh-eren Projektteams als Dienstleister beauftragt werden. So sind zu dieser Gruppe etwa Spezialisten für FEM-Simulationen, Ablaufsimulationen oder die grafische Aufbereitung von Modellen zu zählen. Ihr vertieftes Fachwissen und ihre Routine im Umgang mit komplexen Aufgaben kann auf diese Weise von allen Projekten optimal genutzt werden.

Eine weitere Gruppe zur operativen Projektunterstützung bilden die Verantwortlichen für die Bibliotheken und Standards. Diese setzen die von Normungsgremien definierten Beschlüsse in Mustermodelle für die Projektplaner um und sorgen dafür, dass diese einheitlich genutzt wer-den. Damit wird die Umsetzung der Standards stark vereinfacht und gleichzeitig deren Einhaltung sichergestellt. Zu diesen Aufgaben gehört es auch, die aus der Produktion zurückfließenden Erfahrungswerte in Parameter für die Methoden und Werkzeuge der DF umzusetzen.

Eine dritte Gruppe unterstützt die Projektleitungen und das Management der Planung, indem sie die Daten aus den verschiedenen Projektteams

zusammenfasst und damit projektübergreifende Darstellungen und Analysen ermöglicht. Zu diesem Aufgabenfeld gehört das Fabrik-DMU, in dem alle 3D-Modelle der verschiedenen Planungen zusammengeführt werden, um sie beispielsweise hinsichtlich Kollisionen und Anordnungsoptimierungen zu untersuchen.

Die Anwender dieser Gruppe nutzen eine breite Palette der Methoden und Werkzeuge der DF und verfügen über die Kompetenz, neue Ansätze zu einer praxisnahen Lösung zu bringen. Für diese Gruppe müssen die Methoden und Werkzeuge der DF flexibel auf wechselnde Anforderungen und Fragestellungen anpassbar sein.

Zu den Aufgaben dieser Gruppe gehört auch die Vorbereitung der Softwaresysteme für die Anwendung in Projekten. Dies umfasst die Auswahl geeigneter Softwaresysteme bzw. deren Anpassung an den neuen Planungsfall sowie die Vorbereitung von Stammdaten, wie Maschinen- oder Materialparametern.

- Personal zur IT- und Methodenunterstützung

Die Anwender der Methoden und Werkzeuge sind durch IT-Spezialisten zu unterstützen. Dem jeweiligen Fachbereich sind somit IT-Fachbereichskoordinatoren zugeordnet, welche die langfristige Systemausstattung planen und direkt mit den Anwendern und fertigungstechnischen Vordenkern der Abteilung eine frühzeitige Adaption der IT-Systemlandschaft vorbereiten und gegebenenfalls Projekte zur Realisierung von IT-Systemveränderungen initiieren und steuern.

Daneben stellt der Fachbereich sogenannte Key-User, die über überdurchschnittliche Systemkenntnisse verfügen und neben ihrem eigentlichen Fachwissen auch Grundlagen der IT-Technik beherrschen. Sie sind die erste Anlaufstelle ihrer Kolleginnen und Kollegen bei Fragen zu den IT-Systemen; sie fassen auch die Anforderungen zur Werkzeugweiterentwicklung aus Sicht ihrer Fachaufgaben zusammen.

Die eigentliche Betreuung der IT-Systeme in Form von Anwendersupport, Beauftragung von Weiter- und Neuentwicklungen oder auch der Betrieb der Server und der IT-Infrastruktur übernimmt in der Regel die IT-Abteilung. Diese Fachleute sind auch darauf spezialisiert, dass die richtige IT-Technologie zur Anwendung kommt, dass die Werkzeuge in den Informationsfluss des Konzerns eingebunden werden sowie eine fachgerechte Schulung durchgeführt wird. Zudem kennen sie die Besonderheiten des IT-Projektmanagements und stellen deren Anwendung bei Systemanpassungen und Neueinführung sicher.

Mit dieser vollständigen Organisation sind der langfristige Betrieb und die Weiterentwicklung der Methoden und Werkzeuge der DF gewährleistet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Durchführung der aktuellen Pla-

nungsprojekte. Die unterstützenden Rollen richten ihre Termine nach ihnen aus und stimmen die Meilensteine für die Einführung neuer Werkzeuge und Methoden so ab, dass sie in abgesicherter Form rechtzeitig in den Planungsprojekten genutzt werden können. Die beschriebenen Aufgaben bei der Nutzung der DF werden sich nur in einem Konzern auf verschiedene Mitarbeiter aufteilen. Bei kleineren Unternehmen werden sie in Gruppen zu einer Rolle zusammengefasst.

7 Anwendungen der Digitalen Fabrik

In der praktischen Anwendung der DF kommen meist unterschiedliche Methoden und Werkzeuge in branchenspezifischen Kombinationen mit jeweils besonderen Anforderungen zum Einsatz. Der folgende Abschnitt stellt hierzu einige typische Anwendungen ganzheitlicher Lösungen vor.

Zunächst wird der Industriebau als Beispiel angeführt, dessen digitale Modelle – insbesondere auch der BIM-Ansatz – die Grundlage für die Integration weiterer Gewerke bilden. Es folgt die Darstellung der Gesamtfabrik unter Einschluss des Gebäudes, der Logistik und der geplanten Fertigungsanlagen. Als weiteres Querschnittsthema für alle Fabrikplanungen wird die Logistikplanung vorgestellt. Sie bildet den Abschluss der allgemeinen Beispiele, die anhand der Automobilbranche vorgestellt werden, aber grundsätzlich für alle Industriebranchen gültig sind.

Im Anschluss folgen Beispiele für typische Nutzungen der Methoden und Werkzeuge der DF in der Automobilindustrie. Hier werden die Besonderheiten der einzelnen Fertigungsgewerke vom Presswerk bis zur Fahrzeugendmontage sowie dem Anlagenbau vertieft. Ausgangsbasis ist dabei jeweils die Aufgabe, ein neues Fahrzeug in die bestehende Fertigung einzuplanen.

Ausführlich wird in Abschnitt 7.4.9 auf die Planung einer energieeffizienten Produktion eingegangen. Mit den Werkzeugen der DF kann z.B. der Energieverbrauch von Robotern signifikant reduziert werden.

Einen anderen Schwerpunkt setzt Abschnitt 7.6. In diesem wird aufgezeigt, wie die Werkzeuge und Methoden bei der Konzeption neuer Fertigungstechnologien eingesetzt werden können, um die Einführung der Technologie ganzheitlich abzusichern.

Der Einsatz der DF bei KMU ist das Thema von Abschnitt 7.7. In diesem werden die Methoden und Organisationsformen dargestellt, die besonders für diese Unternehmensgröße geeignet sind.

Es folgt der Blick in weitere Industriebranchen, bei dem anhand des Schiffbaus sowie der Getränkeindustrie spezifische Einsätze der DF dargestellt werden. Dabei werden Besonderheiten der ganzheitlichen Verwendungen in diesen Branchen aufgezeigt.

In Abschnitt 7.10 wird ausführlich der Einsatz mobiler Endgeräte für die Fabrikplanung vorgestellt und diskutiert. Smarte Datenaufnahmeassisten-

ten und spezifische Anwendungssoftware (sogenannte Apps) können dem Planer die Arbeit erleichtern. VR- und AR-Einsätze unterstützt von Quadroopttern bilden ein Highlight. Abschließend wird die Vision einer Digital Lean Factory 4.0 auf Basis einer Delphi-Umfrage vorgestellt.

7.1 Industriebau

Im Industriebau (vgl. auch Abschnitt 2.1) werden CAD-Systeme schon seit längerem als Werkzeug im Planungsprozess eingesetzt. Zur Methode der DF werden sie durch die Integration mit den Systemen zur Planung von Fertigungsprozessen, logistischen Abläufen sowie zur Planung von Ressourcen wie z. B. Anlagen und technischen Installationen. Damit wird der Planungsprozess des Gebäudes (Abb. 7.1) mit dem Planungsprozess der Fertigung sowie der Fabrikeinrichtung eng verzahnt. Die Einzelschritte des Planungsablaufes werden im folgenden Abschnitt erläutert.

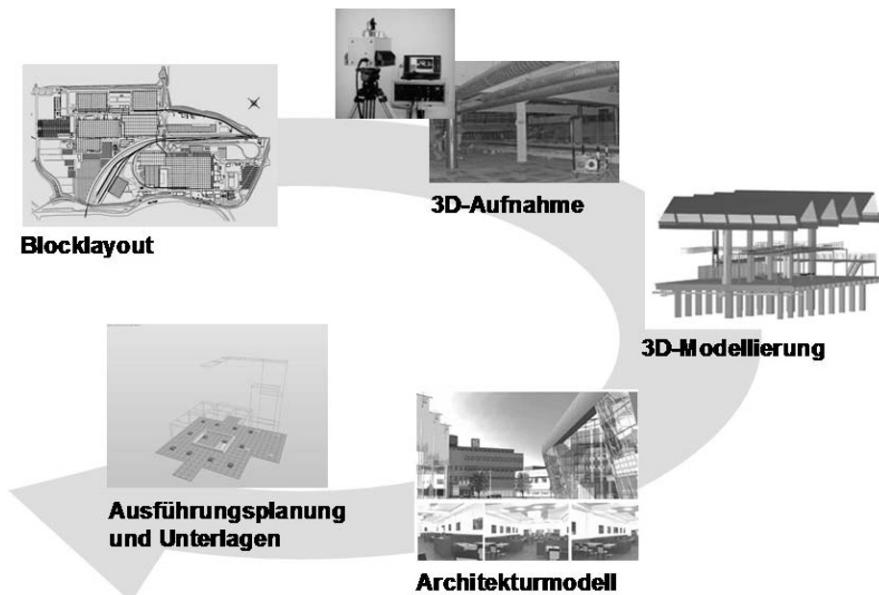


Abb. 7.1 Nutzung Digitaler Modelle für die Planungsstationen im Industriebau

Im Planungsprozess eines Fabrikbaus (vgl. auch Abschnitt 2.1) kommen drei unterschiedliche Prozessmodelle zur Anwendung:

Im ersten Fall erfolgt die Planung von „Außen nach Innen“. Dies bedeutet, dass zuerst das Layout des Gebäudes mit seinem Erscheinungsbild und seinen charakteristischen Eigenschaften festgelegt wird. Dies ist der Fall, wenn die Fertigung in ein vorhandenes Gebäude integriert wird oder die Eckdaten des Gebäudes anhand von Kennzahlen und Erfahrungswerten gebildet wurden. Diese Vorgehensweise ist besonders dann angebracht, wenn das Gebäude eine flexible Struktur erhalten soll, die langlebig für unterschiedliche Produkte und mehrere Produktgenerationen ausgelegt wird. In diesem Fall erfolgt die Integration der Anlagentechnik erst nach einer weitgehenden Festlegung der Gebäudestruktur und -hülle. Somit findet hier erst eine späte Integration der Fabrikplanung in die weiteren Systeme der DF mit einem einseitigen Datenfluss von der Fabrikplanung zur Anlagen- und Prozessplanung statt.

Im zweiten Fall erfolgt die Planung von „Innen nach Außen“. Dies bedeutet, dass zunächst der Fertigungsprozess des Produktes in allen Details festgelegt und in einem Funktions-Layout angeordnet wird. Darauf aufbauend werden nun die Bewegungen der Produkte und Fertigungsmitarbeiter bestimmt, sowie die Maschinen und Anlagen, die logistischen Einrichtungen sowie die technische Gebäudeausstattung und Infrastruktur angeordnet. Den Abschluss bildet die Gebäudehülle, die nun für diesen Fertigungsprozess optimal anzupassen ist. In diesem Prozessmodell wird die Fabrikplanung relativ spät in den Planungsprozess eingebunden; der Datenstrom fließt von der Prozess- und Anlagenplanung zur Layoutplanung des Gebäudes.

Das dritte Prozessmodell kombiniert diese beiden Vorgehensweisen in iterativen Schleifen, indem gleichzeitig sowohl übergreifende Aspekte der Fabrikplanung wie das Erscheinungsbild, die Attraktivität für Mitarbeiter und die Flexibilität der Fertigung als auch die Produktion des aktuellen Produktes verbessert werden. Bei dieser Art der Planung werden sowohl die Gebäude- als auch die Anlagenplanung frühzeitig in den Planungsprozess eingebunden und die Daten mit der Fabrik-, Prozess- und Ressourcenplanung laufend abgeglichen.

In allen drei Prozessmodellen erfolgt die eigentliche Planung des Gebäudes in zunehmender Detaillierung. Die Modellierung des 3D-Layouts geschieht auf Basis der mit einem Laserscanner vermessenen vorhandenen Halle oder bei einer Neuplanung auf Basis des Konzeptlayouts.

Je nach dem Grad der Integration der Fertigungsplanung wird dieses CAD-Modell zur Simulation des Fertigungsprozesses und der weiteren Gebäudenutzung herangezogen. Nach abgeschlossener Überprüfung gilt es, das Modell mit konventionellen CAD-Techniken weiter auszudetaillieren und für die architektonische und bauliche Ausführung zu verwenden.

7.1.1 Building Information Modeling (BIM)

Das Forschungsprogramm ZukunftBAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) definiert in seinem Endbericht das BIM wie folgt:

„Building Information Modeling (BIM) ist eine Planungsmethode im Bauwesen, die die Erzeugung und die Verwaltung von digitalen virtuellen Darstellungen der physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks beinhaltet. Die Bauwerksmodelle stellen dabei eine Informationsdatenbank rund um das Bauwerk dar, um eine verlässliche Quelle für Entscheidungen während des gesamten Lebenszyklus zu bieten; von der ersten Vorplanung bis zum Rückbau“ (Egger et al. 2013, S. 18 in Anlehnung an die Übersetzung aus NBIMS 2013).

BIM umfasst nach Busson (2016) und Weiss (2016):

- Technik und Design – einschließlich Kollisionsminimierung, Designkoordinierung und Werkstattzeichnungen
- Projektkontrolle und -planung einschließlich Earned Value und 4D-Studien
- Vertrags- und Mengenkontrolle – einschließlich Mengenschätzungen und Vermessungen
- Produktion – einschließlich digitaler Fertigung
- Baubestand und Übergabe – sowie Gebäudemanagement
- Umwelt-, Energie und sowie Kohlenstoffbilanz
- Sonstige Bereiche – einschließlich Standortlogistik, vorübergehende Installationen, Gerüste und Schalungstechnik

Damit beinhaltet BIM nicht nur das Modell, sondern auch die Methode im Umgang mit diesem. So werden mit dem Modell unter Zuhilfenahme einer Cloud Menschen, Prozesse, Ideen und Dinge so vollständig vernetzt wie niemals zuvor (Hausknecht und Liebich 2016).

Die Transparenz durch die Verwendung von 3D-Modellen und die Verknüpfung mit den dazugehörigen Daten schafft eine neue Qualität. „Je früher, je greifbarer und je sichtbarer das Ergebnis einer Planung visualisiert werden kann, desto größer ist die Chance, Unschärfen und Differenzen in der Sichtweise aller Beteiligten kleinzuhalten: die Varianz des Projektverständnisses kann auf diese Weise also direkt und positiv beeinflusst werden“ (Jelitto 2016, S. 35 in Anlehnung an die Übersetzung aus NBIMS 2013).

Daher bietet sich an, BIM nun auch bei Fabrikprojekten vollumfänglich in die DF zu integrieren (Kerkenberg 2016).

7.1.2 Die Modellierung der Fabrik

Die Planung einer Fabrik kann entweder eine vollständige Neuplanung (Greenfield) oder die Umplanung einer bestehenden Struktur (Brownfield) betreffen. Um zu einem optimalen Ergebnis zu kommen, sollten beide Planungsfälle von einer Idealplanung ausgehen, die einen optimierten Fertigungsablauf annimmt und eventuelle Einschränkungen durch vorhandene Anlagen oder Gebäude zunächst nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Erstellung des Werksmodells (Abb. 7.2) steht zunächst die grundsätzliche Fertigungsstrategie im Vordergrund, nach der die einzelnen Fertigungsgewerke, Materialwege, Nebenflächen und Sozialräume im Rahmen eines 2D-Block-Layouts positioniert werden. Die Grundlage hierfür sind Erfahrungswerte und Kennzahlen, mit denen die erforderlichen Flächen und deren Eigenschaften bestimmt werden.

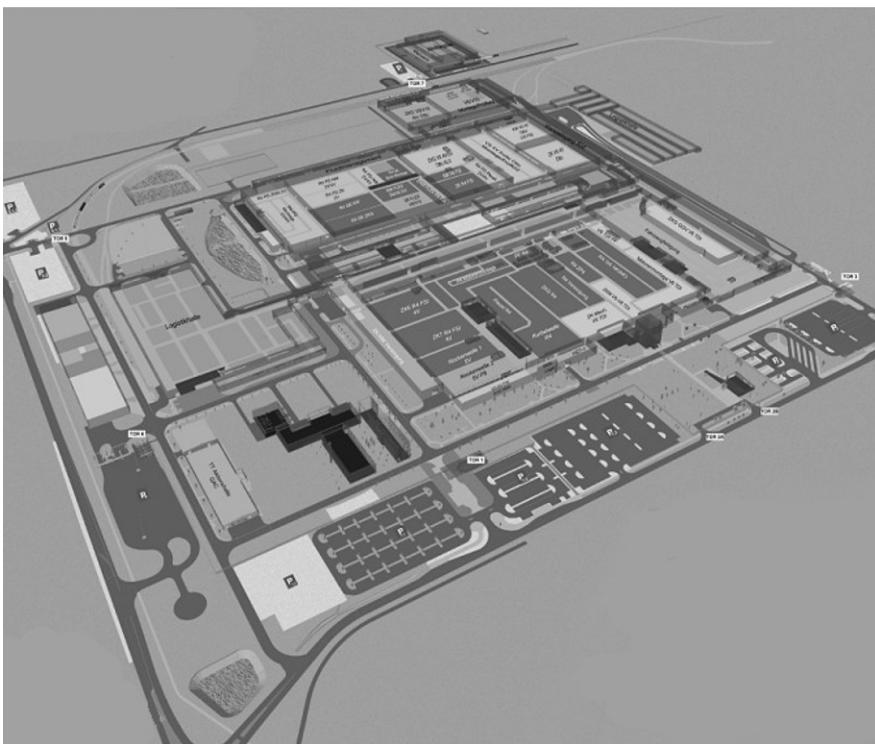


Abb. 7.2 Beispiel eines Werkmodells (Quelle: Volkswagen AG)

Das Werkmodell ist im folgenden Planungsprozess die Grundlage für weitere Planungsschritte. Durch die Detaillierung von Tragestrukturen,

Wänden, Fenstern, Dächern und weiteren Gebäudeelementen ist der Architekt in der Lage, das erste Anschauungsmodell der geplanten Fabrik zu erzeugen (Abb. 7.3). Es muss im Einklang mit der Corporate Culture und der Umgebung stehen.



Abb. 7.3 Virtuelles Architekturmodell eines Eingangsbereichs (Quelle: Volkswagen AG)

Mit der weiteren Vervollständigung des Werksmodells durch die technische Gebäudeausstattung, der Einplanung logistischer Einrichtungen, Förderanlagen oder Lager sowie der Platzierung der Modelle der Fertigungseinrichtungen entsteht sukzessive ein Gesamtabbild der geplanten Fabrik, welches für zahlreiche Analysen und Planungen in den nächsten Planungsphasen herangezogen werden kann.

7.1.3 Ist-Aufnahme eines bestehenden Gebäudes

Bei Um- oder Erweiterungsplanungen erfolgt die Modellierung des Gebäudes anhand einer Ist-Aufnahme des aktuellen Standortes. Die Erfassung der Bestandsdaten der Fabrik (3D-Digitalisierung) mit dem Gebäude, den Tragwerken, der Haustechnik und der Fördertechnik erfordert mit konventionellen Mitteln einen enormen Aufwand. Die herkömmlichen Verfahren der Photogrammetrie und des tachymetrischen Vermessung von Objekten werden wegen ihres großen Zeit- und Kostenaufwandes nur noch selten eingesetzt. Tatsächlich behindert dies den Einsatz rechnergestützter 3D-Planungs- und Optimierungsmethoden massiv.

Laserscan-Systeme erlauben demgegenüber eine exakte, hochauflösende und sehr schnelle räumliche Bestandsaufnahme in Fabriken. Dazu wird ein

dreistufiges Erfassungsverfahren verwendet, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Ausgangspunkt ist ein Hallenbezugssystem, das ein Vermessen von Fabrikobjekten mit hoher Genauigkeit erlaubt. Die Hallenvermessung beginnt mit einer Positionierung der Halle im Werkskoordinatensystem. Nun werden um die Halle herum und in der Halle mehrere Festpunkte aufgemessen und in das Werkskoordinatensystem eingebunden. Diese Festpunkte werden durch dauerhaft angebrachte sogenannte Messbolzen markiert und bilden, wie Abbildung 7.4 zeigt, ein engmaschiges Raster. Dadurch kann der Laserscanner später bei jeder Scanposition mindestens drei Bolzen „sehen“.

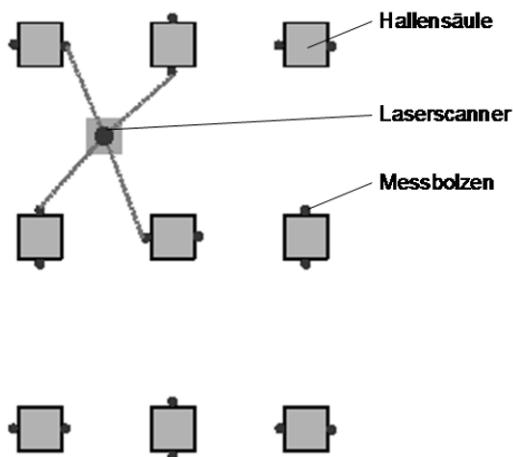


Abb. 7.4 Messbolzen im Hallenbezugssystem (nach iQvolution Services GmbH, Vaihingen/Enz)

Die Positionen der Bolzen werden nun mit einem Tachymeter genau vermessen und im CAD-Layout-System des Unternehmens dokumentiert. Dadurch entsteht ein Referenzraster, welches die Möglichkeit bietet, bei künftigen Planungsschritten das CAD-Modell der DF auf einfache Art mit der realen Raumgeometrie abzulegen.

Wesentlich für das Laserscannen ist, dass mit dem Referenzraster die Vielzahl der aufgenommenen Scans lagerichtig in einem Gesamtmodell der Halle positioniert werden können. Dies sei im Folgenden näher erläutert.

Auf die Messbolzen des Hallenbezugssystems werden zunächst sogenannte Messkugeln (Abb. 7.5, links) aufgebracht, die einen geometrisch genau definierten Körper mit definiertem Reflexionswert und bekannter

Position in der Halle darstellen. Zusätzlich erleichtert eine gut sichtbare Identitätsnummer das spätere Erkennen der Bolzennummer.

Bei der eigentlichen Aufnahme mit dem rotierenden Laserscanner entsteht eine dreidimensionale Punktwolke, die in ein Foto umgesetzt wird. Die Abbildung 7.5 (rechts) verdeutlicht die damit erzielbare hohe Auflösung.



Abb. 7.5 Messpunkt und Laserscangerät (links) und Beispiel einer damit aufgenommenen 3D-Messpunktewolke (rechts) (Quelle: Volkswagen AG)

In der Halle werden so viele Scans durchgeführt, bis jeder relevante Raumpunkt von mindestens einer Seite erfasst ist. Die Punktwolken werden in der Folge zu einem Gesamtmodell der Halle zusammengefasst. Dabei werden die Koordinaten der Messbolzen als Referenzsystem verwendet. Zu beachten ist, dass die Punktwolken immer nur die Oberflächen der gescannten Objekte abbilden, die Objekte also nicht etwa durchstrahlt werden.

Mit einem geeigneten Softwaresystem sind das Betrachten der Scans, das Navigieren in der gescannten Halle, das direkte Vermessen von Abständen und Objektdimensionen und das Übertragen von Punktwolkenausschnitten in CAD-Programme möglich. Die Darstellung einer in dieser Form modellierten Fabrikeinrichtung in einem CAD-Programm verdeutlicht Abbildung 7.6.

Üblich ist eine Übertragung der Punktwolke in CAD-Werkzeuge wie AutoCAD, MicroStation, Intergraph oder CATIA. Wichtig ist, dass die 3D-Scans ein originalgetreues Abbild der Realität zeigen. Damit stellen sie eine eigene Informationseinheit gegenüber den konstruierten 3D-CAD-

Modellen dar und können im späteren Planungsprozess als Referenz und Dokumentation wiederverwendet werden.

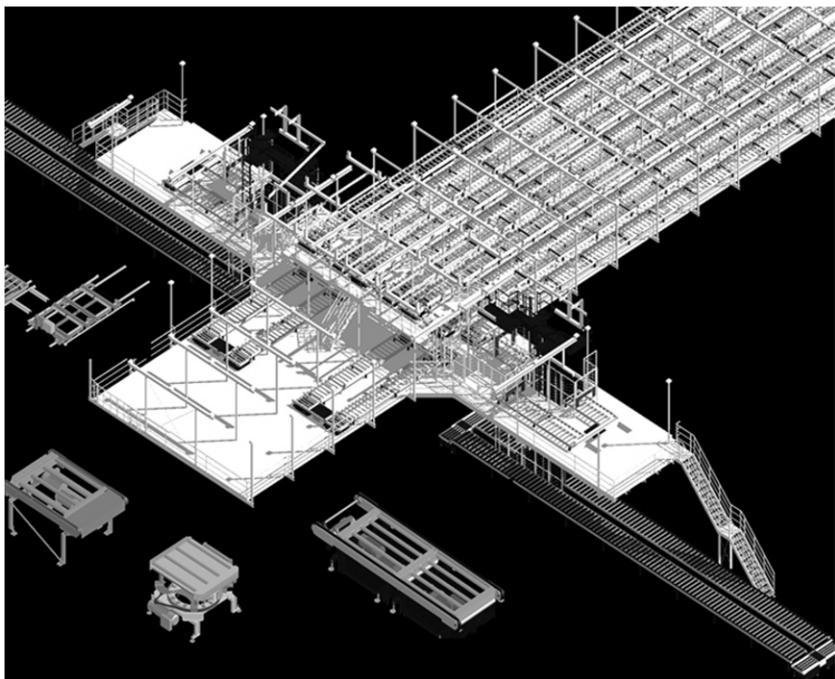


Abb. 7.6 Darstellung von gescannten 3D-Formen in einem CAD-System (Quelle: Volkswagen AG)

Anhand der Punktwolke wird das CAD-Modell konstruiert. Dadurch, dass reale Abbilder vorliegen und zu jeder Zeit geprüft und wieder mit dem CAD-Modell verbunden werden können, kann zu jedem späteren Zeitpunkt die Punktwolke zur weiteren Modellierung herangezogen werden.

Eine ergänzende Technik zur Verringerung der Modellierungsarbeit der Fabrik liefert der Einsatz leistungsfähiger 3D-Objektbibliotheken. Abbildung 7.7 zeigt für das System MicroStation einen Ausschnitt aus der Bibliothek TriCad-MS, die einen umfassenden Katalog von 3D-Objekten, z. B. für den Bereich der Haustechnik oder für Fördermittel enthält.

In den folgenden Planungsschritten ist das auf diese Weise erstellte 3D-CAD-Modell das Referenzmodell für den aktuellen Planungsstand der Fabrik für alle beteiligten Planungspartner und somit eine zentrale Kommunikationsbasis. Mögliche Detaillierungen beziehen sich immer auf diese

Referenz, und alle von der Projektleitung genehmigten Änderungen werden zeitnah in dieses Modell eingearbeitet.

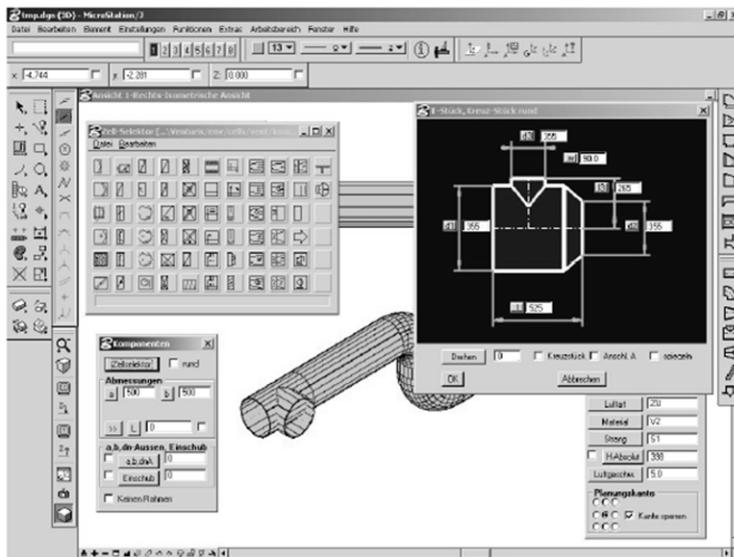


Abb. 7.7 3D-Objektbibliothek für Haustechnik in TriCad-MS 8 (Quelle: Volkswagen AG)

Auf diese Weise ist sichergestellt, dass alle Planungspartner wie Architekten, Bauingenieure, Anlagenplaner, Prozessplaner, Logistikplaner usw. von den selben örtlichen Bedingungen ausgehen und die weiteren Planungsergebnisse bis zur Inbetriebnahme ständig abgeglichen werden.

7.2 Planung der Gesamtfabrik

Das Konzept einer Gesamtfabrik setzt sich aus dem Fabrikgelände mit seinen Freiflächen, den Gebäuden sowie aus den Produktionsanlagen, Logistikeinrichtungen und der Fabrikinfrastruktur zusammen. In den Planungsprozess sind viele verschiedene Parteien eingebunden, die die Fabrik jeweils aus unterschiedlichen Sichten betrachten. So sieht der Architekt einen Schwerpunkt seiner Aufgabe im Erscheinungsbild des Baus, während z.B. der Logistiker einen kreuzungsarmen Materialfluss anstrebt und der Brandschutz sein Augenmerk auf Brandlasten, Rettungs- und Fluchtwegen richtet. Die Gesamtplanung der Fabrik hat die Aufgabe, diese verschiedenen Aspekte zu einem gemeinsamen Optimum zu vereinen.

Diese unterschiedlichen Aspekte der Fabrik werden häufig mit spezieller Anwendungssoftware geplant, oder die Planung einzelner Gewerke wird von einem spezialisierten Planungsdienstleister bzw. dem Lieferanten von Einrichtungen durchgeführt. Dies führt dazu, dass die Daten der Fabrik aus verschiedenen IT-Quellen stammen und in unterschiedlichen 3D-Datenformaten vorliegen. Die digitale Planung und Bewertung der Fabrik ist daher nur möglich, wenn diese Daten in einem einzigen 3D-CAD-Modell zusammengeführt werden.

Dieses CAD-Gesamtmodell der Fabrik ist die Referenz aller aktuell freigegebenen Alternativen und Versionen. Es muss daher einer zentralen Verwaltung unterliegen und in ein Verwaltungssystem eingebunden sein, welches einen schnellen Datenaustausch mit allen beteiligten Planungspartnern zulässt (vgl. auch Kerkenberg 2016).

7.2.1 Fabriklayout

Zur Darstellung der gesamten Fabrik in einem 3D-CAD-Modell (Abb. 7.8) ist der Detaillierungsgrad so zu wählen, dass eine rasche Übersicht für die Planer und Entscheider ermöglicht wird, um die Funktionsweise der Fabrik zu verstehen und zu überprüfen. Hierzu ist es nicht erforderlich, dass alle Konstruktionsdetails abgebildet werden, die für die Belange der Fabrikplanung irrelevant sind. Das 3D-Modell ist also nicht zur konstruktiven Auslegung der einzelnen Komponenten geeignet. Als Gesamtmodell stellt es auch nicht die Farben und Oberflächen der geplanten Fertigung dar, sondern zeigt nur die geometrische Außenform des projektierten Objektes.



Abb. 7.8 Auf der Basis von Laserscans nachgebildeter realitätsnaher Ausschnitt des 3D-Modells einer Produktionshalle (Quelle: Volkswagen AG)

Vor oder parallel zu diesem 3D-Gesamtmodell entsteht die Außenansicht, welche das Erscheinungsbild der Fabrik präsentiert. Das Architekturmodell zeigt die Farbgebung der Gebäudehülle sowie deren Einpassung in das Gelände und wird kontinuierlich mit dem 3D-Gesamtmodell abglichen. Gleiches geschieht auch mit den Modellen einzelner Fertigungsanlagen oder Infrastruktureinrichtungen.

Die Quelldaten des 3D-Gesamtmodells der Fabrik werden aus den originalen Konstruktionsdateien der einzelnen Komponenten bzw. aus der Bausteinbibliothek gewonnen. Um sie im Gesamtmodell darstellen zu können, ist eine Datenreduktion (vgl. Abschnitt 5.4) erforderlich.

Der Umfang der Datenreduzierung stellt einen Kompromiss zwischen der Bearbeitungsgeschwindigkeit des CAD-Systems und der erforderlichen Detailgenauigkeit des 3D-Gesamtmodells dar. Gängige Programme zur Datenreduzierung erlauben eine Einstellung des geforderten Detaillierungsgrades.

7.2.2 Fabrik-DMU

Da bei der Planung einer Fabrik immer mehrere Planungspartner beteiligt sind (Abteilungen innerhalb einer Firma, räumlich getrennte Planungen, Planungsfirmen und Lieferanten), ist eine regelmäßige Abstimmung zwingend erforderlich, um alle Planungsstände der aktiven Beteiligten anhand des in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Gesamtmodells bei den Meilenstein-

treffen abzulegen. In Analogie zum Produkt-DMU wird dieser Ablauf als Fabrik-DMU bezeichnet (vgl. Definitionen Abschnitt 1.2.2).

Im Fabrik-DMU ist es möglich, die Fabrik ganzheitlich und statisch darzustellen (Bracht et al. 2015b). Im dazugehörigen Prozess werden alle 3D-CAD-Detailplanungen der verschiedenen Fachplanungen von einer zentralen Fabrik-DMU-Stelle gesammelt und in einem Gesamtmodell zusammengefasst (Abb. 7.9). Dabei verfolgt das Fabrik-DMU nach König (2013) folgende Ziele:

- Kollisionsprüfung und Beseitigung erkannter Kollisionen
- Abstimmung des Planungsstandes
- Zugänglichkeitsuntersuchungen
- Darstellung logistischer Prozesse
- Abgleich mit Scandaten
- Visualisierung

In einem ersten Schritt werden die Daten anhand von Checklisten formal vorgeprüft. Dabei wird zunächst darauf geachtet, ob die Zeichnungsvorschriften für die Elementgestaltung, Farben oder Bildebenen eingehalten wurden. Die Kollisionsprüfung bildet den zweiten Teil der Vorprüfung. In dieser werden Durchdringungen zwischen den verschiedenen Gewerken, Anlagen und Gebäudeelementen statisch und dynamisch untersucht. Als Abschluss der Vorprüfung steht die fachliche Bewertung an. Dabei werden anhand einer Checkliste u. a. die Freiräume aller Wege geprüft, alle Infrastrukturinstallationen auf Vollständigkeit und Durchgängigkeit betrachtet sowie alle Lüfterfilter auf Zugänglichkeit zur Wartung geprüft. Treten bei dieser formalen Prüfung Probleme auf, die von einem einzigen Zuständigen gelöst werden können, so wird die entsprechende Abteilung unmittelbar um Abstellung gebeten.

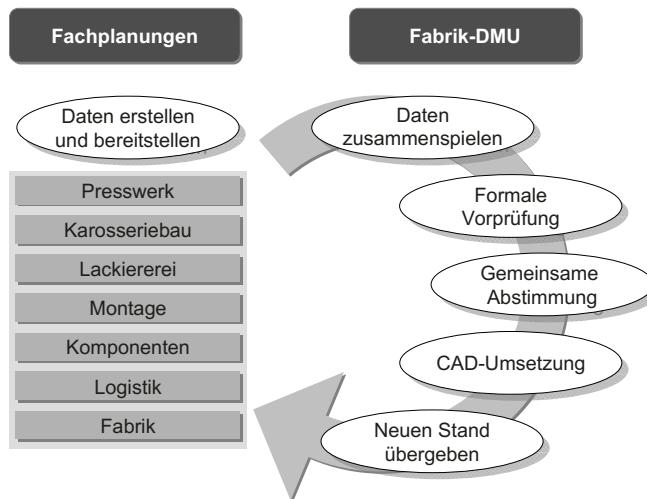


Abb. 7.9 Ablauf des Fabrik-DMU-Prozesses am Beispiel Volkswagen (Quelle: Volkswagen AG)

Wenn die Probleme nur in Abstimmung mit mehreren Beteiligten zu lösen sind, werden sie zu einem Tagesordnungspunkt des nächsten Treffens des Planungsteams (vgl. Abb. 7.10). Dort wird geklärt, wer bis wann für die Abstellung eines Problempunktes zuständig ist.

So erläutert z. B. Csavajda, Teamleiter Digitale Fabrik bei der Daimler AG: „Zu Beginn eines neuen Projekts sind mehr als tausend Kollisionen nicht ungewöhnlich, doch schon nach sechs bis acht Wochen (mit entsprechenden virtuellen Projektsitzungen) liegt dieser Wert nahe bei Null“ (N. N. 2006).

Sind die entsprechenden Maßnahmen den Verantwortlichen zugeordnet, erfolgt deren Umsetzung in den CAD-Modellen. Alle korrigierten Modelle werden über die Fabrik-DMU als neue Referenz wieder den einzelnen Fachabteilungen übergeben und bilden so die Basis für die weiteren Aufgaben. Dieser Iterationszyklus wird so lange durchlaufen, bis alle Details der Fabrik ausgeplant, alle Änderungen der Vorgaben berücksichtigt sind und keine Widersprüche oder Unklarheiten mehr bestehen.

Ist die Fabrik in ihren Funktionen festgelegt, so können die digitalen Modelle und die daraus abgeleiteten Spezifikationen als Grundlage für die Ausschreibung der einzelnen Maschinen, Anlagen und Installationen nach Art und Menge dienen. Auf dieser Basis können die Lieferanten ihre Angebote präzise auslegen, da sie zu jeder Angebotsposition eine entsprechende Referenz im digitalen Modell finden. Diese Vorgehensweise be-

schleunigt den Angebotsprozess, macht die Angebote vergleichbar und erhöht dadurch die Qualität der Angebote für den Auftraggeber.



Abb. 7.10 Expertentreffen zur virtuellen Prozessabsicherung im Planungsraum DF (Bracht und Rooks 2008, Foto: Daimler AG)

Die detaillierte Konstruktion der einzelnen Baugewerke, Maschinen, Anlagen, Installationen und Einrichtungen der Fabrik erfolgt mit entsprechend spezialisierten CAD-Systemen mit häufig fachspezifischen Funktionen zur Gestaltung, ggf. auch mit Berechnungsfunktionen zur Statik oder Dynamik des konstruierten Objektes. Allerdings finden diese Arbeiten in der Regel beim Lieferanten der Fabrikausrüstung statt und es wird dazu eine Vereinbarung über Umfang, Detaillierungsgrad und Formatierung der zu übergebenden Daten getroffen (siehe auch Abschnitt 5.4.5).

Während der Bauausführung dient das entsprechende Modell vor Ort im Wesentlichen zwei Zwecken. Zum einem sind in ihm alle Maße des Baus gespeichert. Zum anderen können einzelne Punkte auf einen Tachymeter überspielt werden, dessen Position im Gelände anhand der Hallenrasterpunkte exakt bestimmt werden kann. Mit einem zusätzlichen Laserpointer ausgestattet, können mit diesem Tachymeter dann z.B. die Positionen der einzelnen Bohrlöcher zur Fixierung von Anlagenfundamenten, Stahlbauten oder Lichtschaltern bestimmt werden. Das ist genauer und schneller als manuelle Verfahren zum Einmessen der Bauten.

Trotz dieser neuen Präzision im Aufbau der einzelnen Objekte wird es in der Realität immer wieder zu Bauabweichungen kommen. Aus diesem Grund hat es sich daher bewährt, den Baufortschritt in sinnvollen Abstän-

den mit Laserscans zu verfolgen, um so ein aktuelles Abbild der realen Fabrik über bestimmte Zustände zu erhalten. Anhand dieser Scans wird das CAD-Gesamtmodell dann mit der Ist-Situation im Bau abgeglichen. Bauabweichungen und erforderliche Maßnahmen können in einer täglichen Baubesprechung aktuell korrigiert werden.

7.3 Planung der Logistik

Neben dem Industriebau mit seiner Infrastruktur ist die Logistik der zweite Bereich, der in allen Industrieunternehmen geplant wird und als Infrastruktur alle Gewerke der Fertigung und Montage miteinander verbindet.

Die Logistikplanung wird im Wesentlichen bei vier Aufgaben durch die Methoden und Werkzeuge der DF unterstützt (Abb. 7.11): Der Behälterplanung, Materialflussplanung und -simulation, der kinematischen Simulation von Bewegungen und Durchfahrten in Fördereinrichtungen sowie der Konzeption und Konstruktion von Betriebsmitteln der Logistik, wie Lager oder Handhabungs- und Transporteinrichtungen.

Neben diesen Gestaltungsfeldern werden außerhalb der Fabrikplanung zahlreiche weitere Aufgabenstellungen im Planungsprozess der Logistik unter Zuhilfenahme von IT-Anwendungen durchgeführt. Darunter fällt die Planung der Lieferbeziehungen, in denen anhand der Stücklisteninformationen die Bezugsquellen und Verbrauchsorte aller im Produktionsprozess benötigten Materialien, Halbzeuge und Fertigprodukte erfasst und dokumentiert werden. Nach der Planung geeigneter Transportmittel, Lieferwege und Lager werden die Frachtkosten ermittelt.

Die Logistikplanung kann mit Berechnungs-, Simulations- oder Optimierungsfunktionen unterstützt werden. In der Realisierungsphase erfolgt die Ausschreibung, Beauftragung und Lieferung der geplanten Betriebsmittel der Logistik.

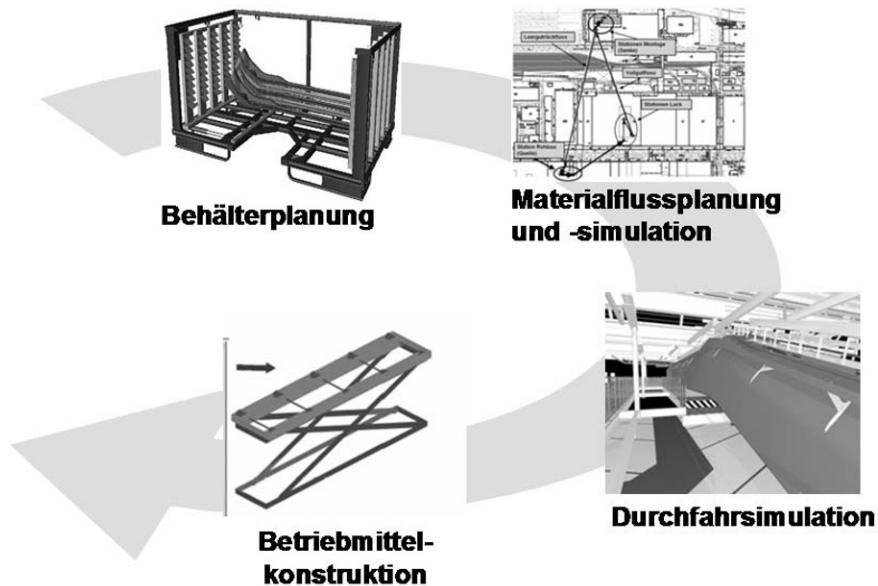


Abb. 7.11 Handlungsfelder der Digitalen Fabrik in der Logistikplanung (Quelle: Volkswagen AG)

Nach Abschluss der Planung besteht das operative Tagesgeschäft der Logistik aus der Bedarfsplanung, Disposition und Bestellung der einzelnen Transportaufträge. Für diesen Aufgabenbereich sowie dem daran beteiligten Änderungsmanagement werden meist umfangreiche Logistikverfahren eingesetzt, die über die Aufgaben der DF hinausgehen.

Der Informationsfluss aus dem Planungsprozess der Logistik verknüpft in ständigem Wechselspiel Elemente der DF mit anderen IT-gestützten Planungsschritten (Abb. 7.12). Die wachsende Bedeutung der methodischen und technischen Möglichkeiten von Industrie 4.0 sowie deren praktische Umsetzung in der Logistik zeigen Vogel-Heuser et al. (2016) auf.

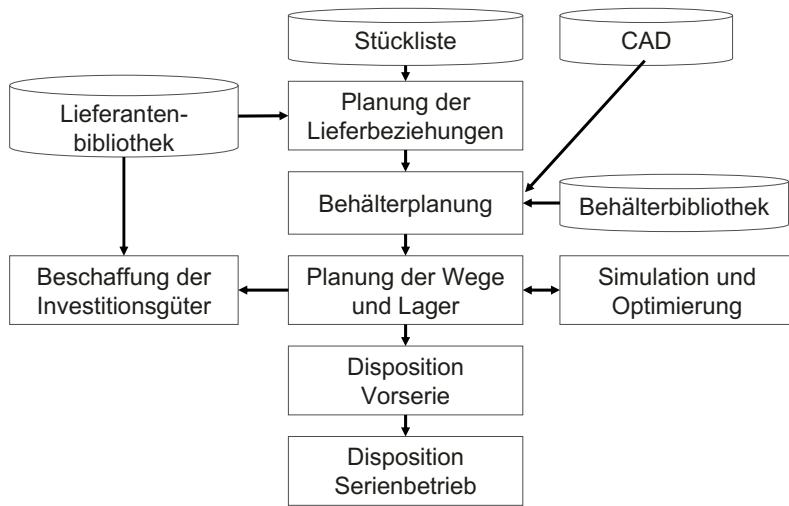


Abb. 7.12 Informationsflüsse im Planungsprozess der Logistik (Quelle: Volkswagen AG)

Die Auswahl der richtigen Behälter für jedes Teil aus der Produktstückliste ist eine wesentliche Ausgangsgröße der weiteren Planung des Logistikprozesses. Erst wenn die Behälter endgültig bestimmt sind, können die Lagerflächen, das Transportvolumen sowie die Fördermittel und Handhabungseinrichtungen im Detail ausgelegt werden. Bei den drei üblichen Behälterkategorien bestehen unterschiedliche Optimierungsansätze:

- *Schüttgutbehälter* entsprechen in ihrer Form Standardbehältern. Eine Simulation kann berechnen, wie viele Teile einer vorgegebenen Geometrie (z. B. Schrauben, Winkel) bei zufälliger Schüttlage in einen Behälter passen.
- *Standardbehälter* haben branchenübliche oder unternehmensspezifische Maße und Formen. Mittels einer Simulation, ggf. unterstützt durch Optimierungsalgorithmen, kann eine Befüllungsvorschrift ermittelt werden, nach der möglichst viele Teile in einem vorgegebenen Raum untergebracht werden können.
- *Spezialbehälter* sind Sonderkonstruktionen für die Aufnahme bestimmter Teile oder Materialien. Sie sind speziell an die Geometrie des Frachtgutes angepasst und haben die Aufgabe, diese transportsicher zu fixieren und in möglichst großer Stückzahl je Behälter zu transportieren. Mit einer Stapelsimulation kann eine optimale Befüllung simuliert werden.

Im Zuge der Bestimmung der Transportbehälter kann sich ergeben, dass leicht abgeänderte Produktgeometrien oder Verschiebungen von Arbeitsfolgen zwischen Quelle und Senke zu einer erheblichen Reduktion der Transport- und Lagerkosten führen können. Bei einem hohen Transportaufkommen können hier Simulationen zu einer deutlichen Senkung der Logistikkosten führen. Bracht und Sydow (2016) zeigen hierzu die Optimierung von Behältermanagement-Prozessen mithilfe vernetzter Technologien auf.

7.3.1 Einsatz der Ablaufsimulation in der Logistikplanung

Die Planung der Transportwege, Losgrößen, Lagerflächen und weiterer Aspekte des logistischen Gesamtprozesses kann mit Hilfe einer Ablaufsimulation abgesichert werden. Abb. 7.13 zeigt die Oberfläche eines Modells zur Ablaufsimulation. Eine derartige Untersuchung kann beispielsweise nachweisen, ob die geplanten Materialmengen auf Basis des vorhandenen Konzeptes umgeschlagen und transportiert werden können. Mit der systematischen Variation einzelner Modellparameter und wiederholten Simulationsläufe sind Untersuchungen des Konzeptes in Bezug auf vorgegebene Ziele möglich. Weitere Ausführungen zur Simulation als Methode finden sich in Abschnitt 4.6.3.

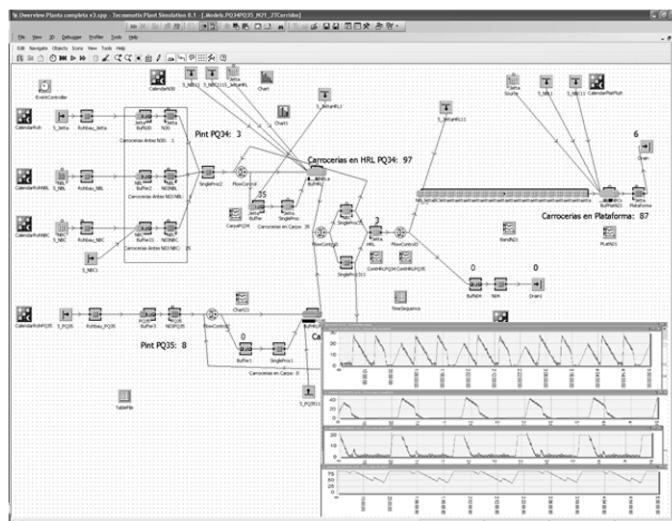


Abb. 7.13 Blockmodell einer Ablaufsimulation mit Bestands- und Mengenverläufen an vorgewählten Messpunkten (Quelle: Volkswagen AG)

Der Aufbau von Simulationsmodellen erfordert Expertenwissen. Die Modelleinstellung kann durch Bausteinbibliotheken, die Modellelemente für typische Systemkomponenten wie beispielsweise Transportfahrzeuge, Maschinen oder Lager enthalten, unterstützt werden. Durch Nutzung und regelmäßige Anpassung der Bausteinbibliotheken an neue Betriebsmittel oder die Erweiterung aufgrund von Anforderungen aus durchgeführten Projekten entsteht in den Bausteinbibliotheken umfassendes Know-how zur Modellierung von Logistiksystemen. Die Entscheidung zur Aufnahme und Veränderung einzelner Bausteine ist damit ein wesentliches Element der Standardisierung der Planung und somit des Wissensmanagements eines Unternehmens. Eine anwendungsgerechte Bausteinbibliothek mit abgesicherten Simulationsparametern kann die Ablaufsimulation wesentlich unterstützen und einen hohen wirtschaftlichen Beitrag bei der Gestaltung der Logistikprozesse liefern.

Der Einsatz der Simulation zur Untersuchung von Logistikprozessen lässt sich auf verschiedenen Ebenen betrachten. Eine typische Gliederung ist die Aufteilung zum einen in die externe Logistik mit der Betrachtung der Lieferwege der Lieferanten und externen Standorte zum betrachteten Werk und zum anderen in die werksinterne Logistik, welche die Lieferwege vom Wareneingang bis zu den Zwischenlagern der Fertigung betrachtet. Sydow (2017) hat hierzu mit Hilfe der Simulation Behältermanagement-Prozesse untersucht und mit Einsatz neuer vernetzter Technologien erheblich verbessert.

Eine dritte Ebene bildet der Warenverkehr von den Zwischenlagern der Fertigung bis zum Verbrauchszeitpunkt bei der Fertigung und Montage. Die Simulation des Fertigungsprozesses selbst, zur Ermittlung der Ausbringung der Fertigungsanlage und der Durchlaufzeit der Produkte, bildet die vierte Ebene. Ein Beispiel für ein Simulationsmodell zur Gestaltung eines Systems zur Ablaufsimulation mit eingeblendeter Wegebelaistung ist der Abbildung 7.14 zu entnehmen.

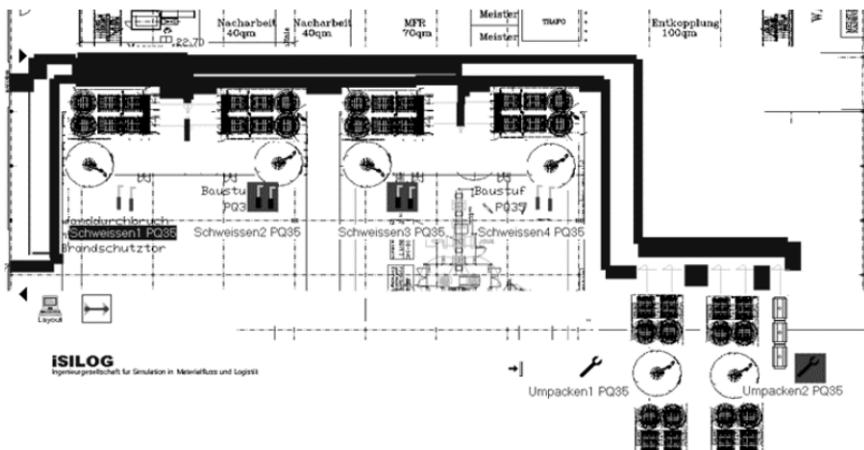


Abb. 7.14 Detailmodell einer Wegesimulation mit eingeblendeteter Wegebelastung (schwarze Balken) (Quelle: Volkswagen AG)

Die Detailsimulation wird zur transparenteren Darstellung mit einem 2D-Anlagenlayout verknüpft. Darin können dann auch Ergebnisse der Simulation wie die Wegebelastung oder Stauzonen kenntlich gemacht werden.

Eine weitere Anwendung ist das Line-Back-Verfahren. Dabei wird die gesamte logistische Wertschöpfungskette in umgekehrter Richtung analysiert. „Zu den wesentlichen Vorteilen gehören geringe Bestände und kurze Durchlaufzeiten. Die erhöhte Logistikeffizienz mündet aber auch in eine deutlich höhere Prozessqualität, d. h. in weniger Fehlteile“ (Graf und Baller 2016, S. 57).

7.3.2 Auslegung der Betriebsmittel der Logistik

Durch die Planung der Logistikprozesse sind die Anforderungen an die einzelnen logistischen Einrichtungen wie Förderanlagen und Lagereinrichtungen im Wesentlichen vorgegeben. Eine weitere Detaillierung dieser Anlagen erfolgt in einer ersten Stufe in einer konzeptionellen Ausprägung (Abb. 7.15), meist durch die Verwendung von CAD-Modellen aus einer Bibliothek sowie gelegentlichen Neumodellierungen.

Diese Modelle werden in das 3D-Gesamtmodell der Fabrik (Abschnitt 7.2.1) eingespielt, um eventuelle Kollisionen mit dem Gebäude, der Infrastruktur und den Fertigungseinrichtungen zu erkennen.

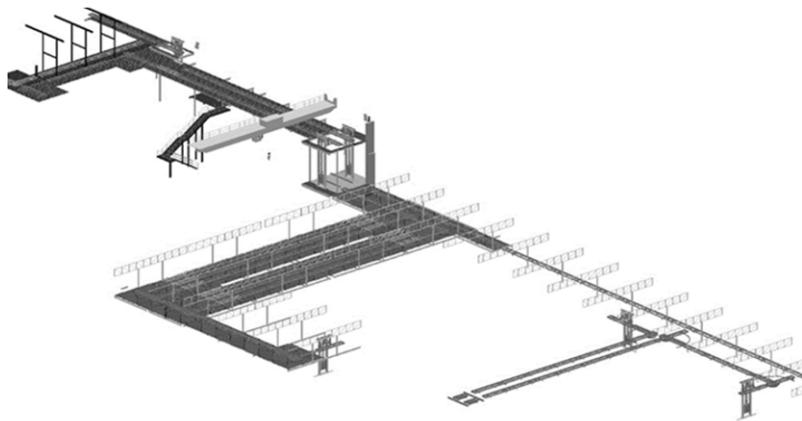


Abb. 7.15 Isoliertes konzeptionelles Modell einer Förderanlage (Quelle: Volkswagen AG)

Auf Basis der konzeptionellen 3D-Modelle erfolgt die Detailkonstruktion in speziellen CAD-Programmen zusammen mit der Berechnung der Statik, der vollständigen technischen Bemaßung (Abb. 7.16) sowie der Erzeugung von Fertigungsunterlagen.

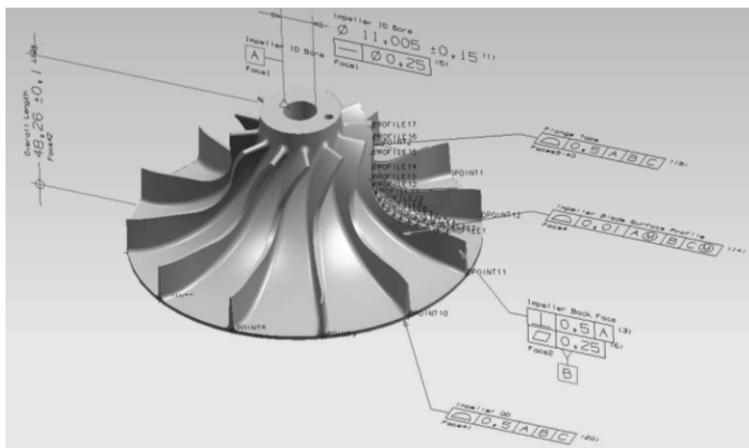


Abb. 7.16 CAD-Auslegung eines Bauteiles (Quelle: Siemens AG, München)

Zur Absicherung der Funktionsfähigkeit geplanter logistischer Einrichtungen wird häufig eine kinematische Simulation der Transportprozesse vorgenommen. Ergebnis dieser Analyse ist die Beseitigung möglicher Kol-

lisionen und Engpässe durch Bewegungen. Typische Fragestellungen und erforderliche Analysen sind:

- Können die Fördermittel mit den transportierten Gütern kollisionsfrei den gesamten Förderweg passieren? Für diese Analyse wird durch den simulierten Transport ein virtueller Schlauch mit der Umrisskontur des Transportgutes gebildet. Dieser wird dann in den modellierten Anlagen und Gebäuden auf Kollision geprüft.
- Können alle Fahrwege von den geplanten Fahrzeugen genutzt werden? Stimmen die Wegbreiten und passen die Lenkradien der Fahrzeuge im beladenen Zustand?
- Kommt es an Engstellen wie Toren, Brücken oder Absperrungen zu Kollisionen?
- Wo sind Verkehrsengpässe? Simuliert man das gesamte Transportaufkommen anhand der geplanten Transportwege und Volumen, so lässt sich feststellen, ob es im gesamten Verkehrsnetz, z. B. an Kreuzungen oder Ladestationen, zu regelmäßigen Staus kommt, die den Durchsatz insgesamt behindern.

Ein solcherart geprüftes CAD-Modell kann mit den betroffenen Experten auf anschauliche Art und Weise besprochen werden und wird zum Garanten einer abgesicherten Inbetriebnahme und einer durchgängigen Funktionsweise der gesamten logistischen Prozesse.

7.4 Ganzheitlicher Einsatz in der Automobilindustrie

Die Automobilindustrie hat einen großen Nutzen durch die Verwendung der DF erzielt und ist daher seit vielen Jahren neben der Luft- und Raumfahrtindustrie ein Vorreiter in der Entwicklung und im Einsatz dieses Konzeptes. Der große Nutzen ergibt sich aus den hohen Stückzahlen in der Produktion, der Sicherstellung der hohen Qualitätsansprüche sowie der Verkürzung der relativ langen Durchlaufzeit der Produkte. Diese Potenziale machen es wirtschaftlich, jeden einzelnen Fertigungsschritt exakt vorzuspannen und dabei die bestmöglichen Planungsmethoden einzusetzen.

Der Einsatz der DF in der Automobilindustrie wirkt in zwei Richtungen. Zum einen dient sie dazu, das Produkt für eine wirtschaftliche Großserienherstellung zu gestalten. Dazu werden die Einzelteile und Baugruppen des Produktes hinsichtlich der Herstellbarkeit sowie der zu erwartenden Herstellkosten in einem ersten Kreis untersucht. Zum anderen unterstützen die Methoden und Werkzeuge eine optimale Auslegung des Fertigungsprozesses und der dazugehörigen Ressourcen in einem zweiten Kreis. Dessen Ergebnisse fließen in die Produktbewertung des ersten Kreis-

ses ein. Das Zusammenspiel der beiden Wirkungskreise zeigt Abbildung 7.17.

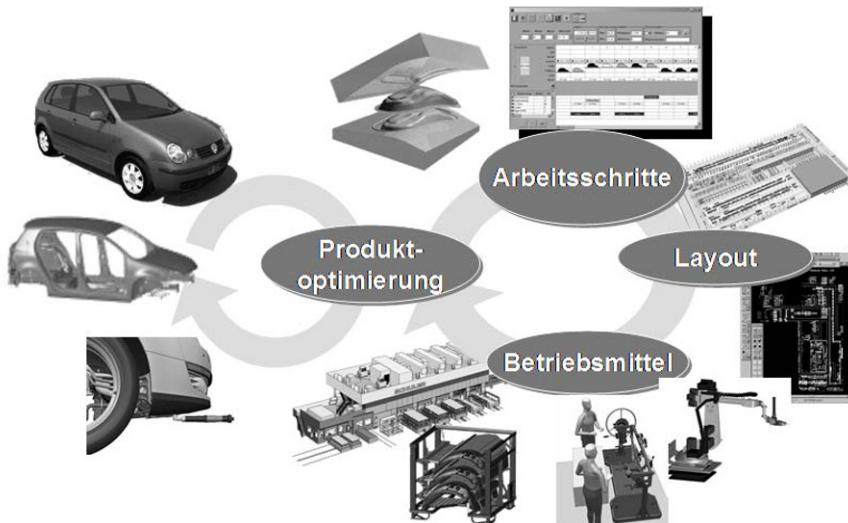


Abb. 7.17 Planungsprozess mit Produktionsplanung und Fertigungsprozessmanagement

Dabei treten bei den verschiedenen Fertigungsschritten der Automobilproduktion unterschiedliche Planungsaspekte in den Vordergrund. Den Grobablauf der Fahrzeugfertigung zeigt Abbildung 7.18. Die fertige Karosse entsteht aus den Blecheinzelteilen des Presswerks, die im Karosseriebau zusammengefügt werden und in der Lackierung ihre Oberflächenschichten erhalten. In paralleler Fertigung werden die Komponenten wie Sitze oder Achsen, die Aggregate wie Motor und Getriebe sowie weitere Zulieferteile gefertigt. In der Fahrzeugmontage entsteht aus diesen Komponenten das Gesamtfahrzeug. Schließlich verbinden mehrere Querschnittsthemen wie die Fabrik- und Infrastrukturplanung oder die Logistik übergreifend die einzelnen Gewerke und werden so zu einem separaten Thema für die Betrachtung der DF in der Automobilindustrie.

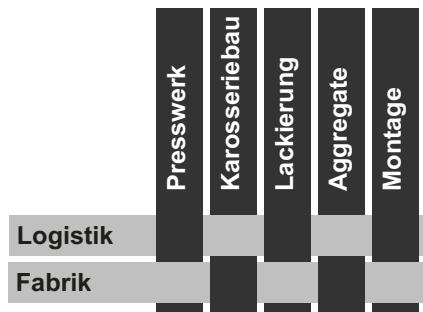


Abb. 7.18 Ablauf der Automobilfertigung mit Gewerken und Querschnittsthemen der Digitalen Fabrik (Quelle: Volkswagen AG)

Jedes einzelne Gewerk benötigt seine spezielle Planung, um den Anforderungen der unterschiedlichen Fertigungstechnologien gerecht zu werden und setzt somit auch unterschiedliche Schwerpunkte bei der Nutzung der Methoden und Werkzeuge. Wie die Methoden und Werkzeuge der DF in den einzelnen Gewerkten eingesetzt werden, soll im Folgenden verdeutlicht werden. Das Querschnittsthema der Fabrikplanung wurde im Abschnitt 7.2 behandelt, die Logistik im Abschnitt 7.3.

7.4.1 Planung eines Presswerks

Bei der Presswerkplanung (Abb. 7.19) treten zwei sehr unterschiedliche Planungsprozesse auf.

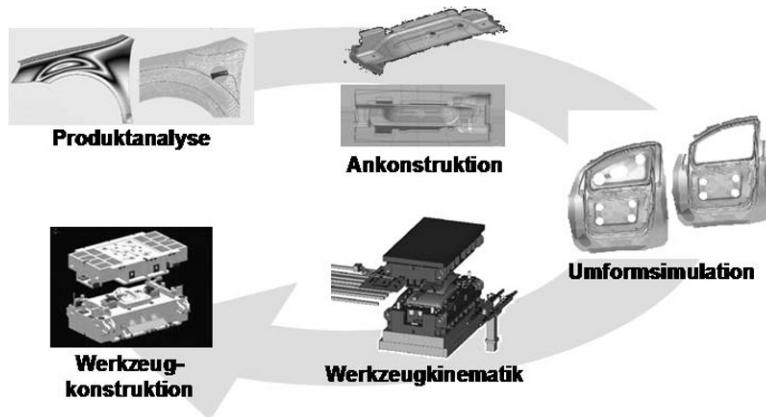


Abb. 7.19 Handlungsfelder der Digitalen Fabrik in der Presswerksplanung

Die Pressenstraßen (Abb. 7.20 rechts zeigt eine Mehrstufenpresse) werden als produktunabhängige Investitionen geplant und dienen meist der Fertigung mehrerer Fahrzeuggenerationen. Die Presswerkzeuge (Abb. 7.20 links) bestimmen dagegen die Geometrie der einzelnen Formteile und werden daher für jedes Fahrzeug neu konstruiert.

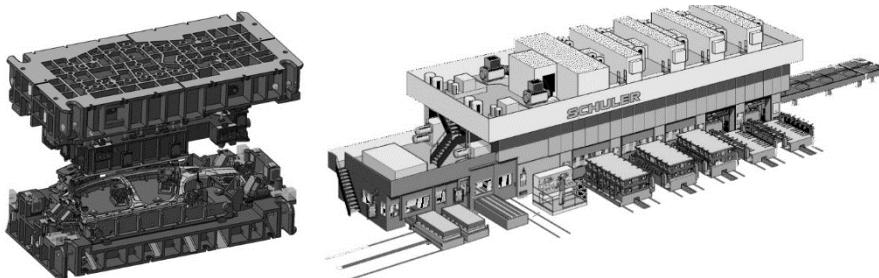


Abb. 7.20 Presswerkzeug und Pressenstraße (Quelle: Volkswagen AG)

Mit der Übergabe der ersten Geometriedaten aus der Entwicklung beginnt die Presswerkplanung mit der Produktanalyse und der Ziehsimulation (Abb. 7.21). In dieser Methodenplanung wird festgelegt,

- welche Konstruktionsdetails (Radien, Flanschlängen etc.) zu optimieren sind, um eine Herstellbarkeit der Teile zu gewährleisten;
- in welchen Umformstufen sich die gewünschte Form prozesssicher, d. h. ohne Faltenbildung oder Reißer, herstellen lässt und
- welche Größe und Form die Ankonstruktion sowie die Platine haben soll.

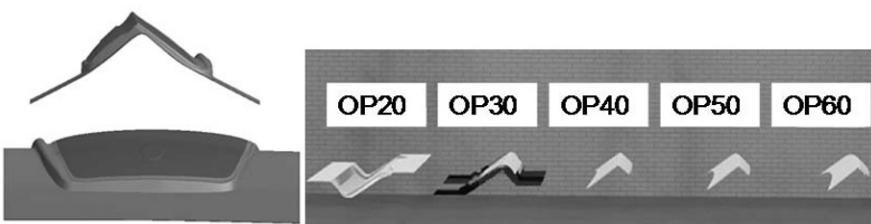


Abb. 7.21 Mit Ziehsimulation ermittelte Operationsstufen (OP) einer Fahrzeug-Heckklappe (Quelle: Volkswagen AG)

Nachdem feststeht, welche Werkzeuge benötigt werden, erfolgt die Ausschreibung und die Vergabe der Konstruktion und Anfertigung an die Lieferanten. Bei der Konstruktion wird in einer Kinematiksimulation

(Abb. 7.22) untersucht, ob sich das teilweise umgeformte Blech kollisionsfrei in das Werkzeug einlegen und nach der Umformung daraus entnehmen lässt. Hinzu kommt die Simulation der internen Werkzeugmechanik sowie des störungsfreien Auswurfs der evtl. abgetrennten Blechteile.

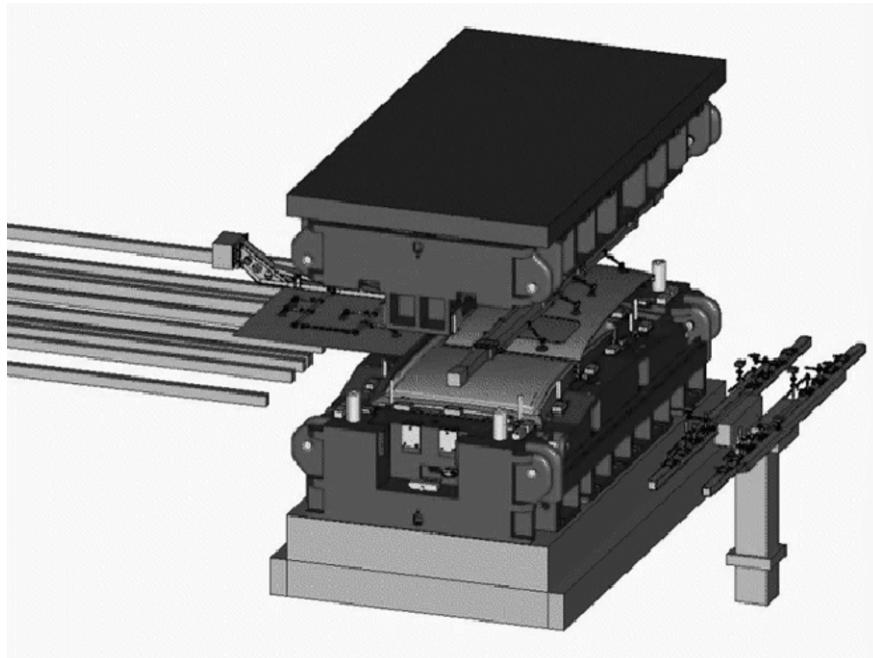


Abb. 7.22 Kinematiksimulation eines Presswerkzeugs (Quelle: Volkswagen AG)

Nach der Konstruktionsabnahme beginnt der Guss des Stahlkörpers für das Werkzeug. Dieser Arbeitsschritt umfasst aufgrund der Notwendigkeit des wiederholten Aushärtens und Aufwärmens mehrere Wochen. Bis zu diesem Punkt kann die Werkzeugvorbereitung parallel zur Konstruktion der endgültigen Teilegeometrie erfolgen. Mit dem nächsten Schritt, dem Fräsen des Werkzeugs, sind Änderungen nur noch mit erheblichen Kosten möglich. Daher ist die Fräsfreigabe als wichtiger Meilenstein im Projekt- ablauf definiert. Dabei werden die abgestimmten Geometriedaten der Teile an die Hersteller überspielt und dort mit Hilfe von CAM-Programmen zu den Steuerungsanweisungen für die NC-Fräsmaschinen aufgearbeitet.

Die Planung der Pressen beginnt mit einer Konzept- und Kapazitätsplanung. Dabei werden die Technologie, Parameter der Pressenstraße sowie die erforderliche Kapazität berücksichtigt. Zum Abschluss der Konzeption entsteht das Layout in Form eines virtuellen Pressenmodells (Abb. 7.23).

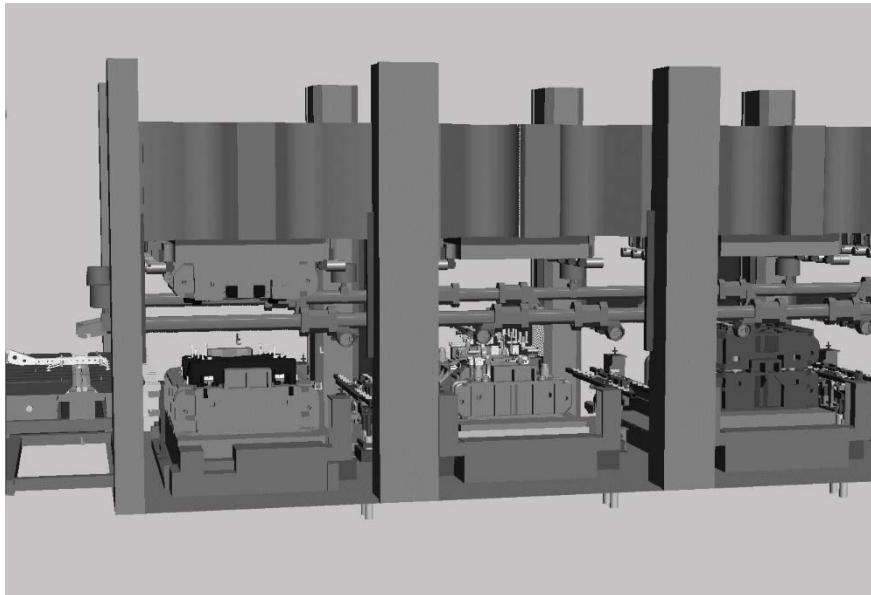


Abb. 7.23 Virtuelles Modell einer Pressenstraße (Quelle: Volkswagen AG)

Das Modell dient als Basis für die Ausschreibung und kann von anderen Abteilungen, wie der Fördertechnik- und der Versorgungstechnikplanung, als Grundlage für erste Konzepte genutzt werden. Mit den eingehenden Angeboten erfolgen der Angebotsvergleich der Bieter und die Vergabe an einen Lieferanten. Gemeinsam mit dem ausgewählten Lieferanten wird die Detailkonstruktion der Pressen oder Pressenstraße durchgeführt. Dabei entsteht zusätzlich das Layout für Anschlüsse der Versorgungs- und Fördertechnik.

7.4.2 Planung eines Karosseriebaus

Die Karosseriebauplanung unterteilt die Gesamtkarosserie in Baugruppen. Typische Zerlegungen sind der Boden, die Seitenelemente oder das Dach, welche parallel gefertigt werden. Diese fließen in den Zusammenbau der Karosserie ein. Später werden die Anbauteile wie die Klappen hinten und vorn sowie die Türen ergänzt. Den Ablauf der digitalen Planung zeigt Abbildung 7.24.

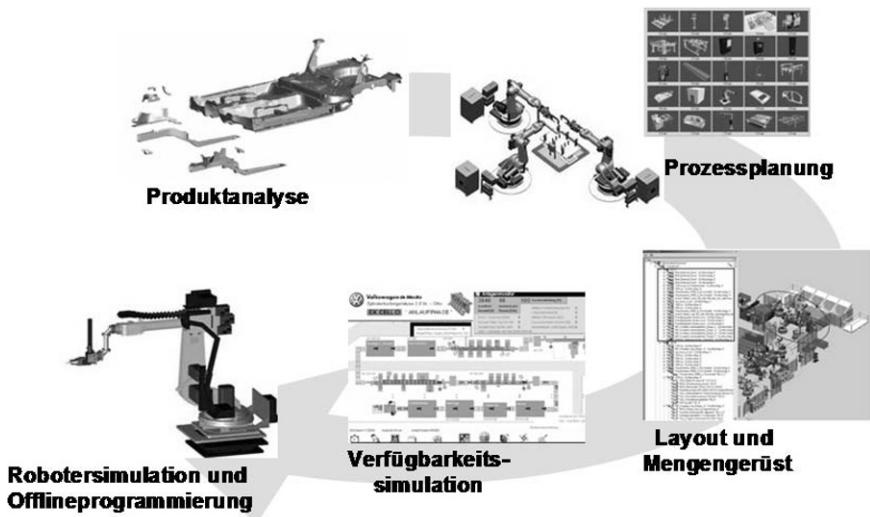


Abb. 7.24 Handlungsfelder der DF in der Karosseriebauplanung

Während der Konstruktion der Karosserie wird für ihre Baugruppen festgelegt, welche Teile mit welcher Verbindungstechnik zusammengefügt werden. Dies können Schweißpunkte oder -nähte, Nietverfahren, Clinchen, aber auch in zunehmendem Umfang Klebetechniken sein. Alle Verbindungen einer Baugruppe werden in einem Fügeplan zusammengeführt. Dieser enthält die Fügetechnik, Geometrie und dazugehörige Fertigungsdaten und ist bei modernen CAD-Systemen direkt in das CAD-Modell integriert.

Eine Baugruppe wird jeweils in einer Fertigungsanlage gefügt (Abb. 7.25). Diese besteht aus mehreren mit Fügewerkzeugen bestückten Robotern, Steuergeräten sowie Handhabungsvorrichtungen und ist von einem Sicherheitszaun umgeben. Dabei ist eine Fertigungsinsel jeweils für mehrere Varianten ausgelegt. So bearbeitet eine Dachstation beispielsweise Dächer mit und ohne Schiebedach.

Der eigentliche Fügeprozess, wie das Schweißen oder Nieten, wird dabei von Robotern ausgeführt. Aber auch das Einlegen der Blechteile in den Formrahmen und die Weitergabe an die nächste Bearbeitungsstation erfolgt mit automatischen Handhabungsgeräten. So sind z. B. in der Karosseriefertigung bei Volkswagen in Wolfsburg in vier parallelen Fertigungsstraßen in etwa 1.800 Roboter im Einsatz.



Abb. 7.25 Virtuelles Modell einer Fertigungsanlage für eine Karosseriebaugruppe
(Quelle: Volkswagen AG)

Von zentraler Bedeutung für die Genauigkeit der Karosserie sind die sogenannten Geometriestationen. Die Formrahmen dieser Geometriestationen enthalten Befestigungselemente, die exakt der Karosseriegeometrie entsprechen. Diese werden daher als Negativ-Elemente anhand der CAD-Daten für die Einzelteile gefertigt. Die Form ist an die spezifische Fahrzeugeometrie angepasst und gewährleistet die genaue Lage der Bauteile zueinander. Ebenso formspezifisch sind zum Teil die Greifzangen der Handhabungsroboter, die Schweißzangen und Nietwerkzeuge sowie die Roboterprogramme.

Die Feinplanung der Anlagen erfolgt in Zusammenarbeit mit den Lieferanten, da erst nach der Beschaffungsvergabe die exakten Maße, Bewegungsgeometrien und Leistungsdaten der Roboter bekannt sind.

In dieser Phase wird die endgültige Robotersimulation der gesamten Anlage durchgeführt, mit der die Erreichbarkeit aller Fügestellen und eventuelle Kollisionen bewegter Elemente mit dem Produkt oder mit Anlagenteilen oder anderen bewegten Betriebsmitteln untersucht werden (Abb. 7.26). Nach Abschluss dieser Arbeiten erfolgt die Offline-Programmierung der Roboter.

Ein wichtiger Meilenstein für die Layoutoptimierung ist die Anfertigung der Fundamente für die Roboter. Danach sind Änderungen nur noch in geringem Umfang möglich oder mit höheren Kosten verbunden. Daher besitzt in der Karosseriebauplanung die Simulation der Roboterkinematik einen hohen Stellenwert.

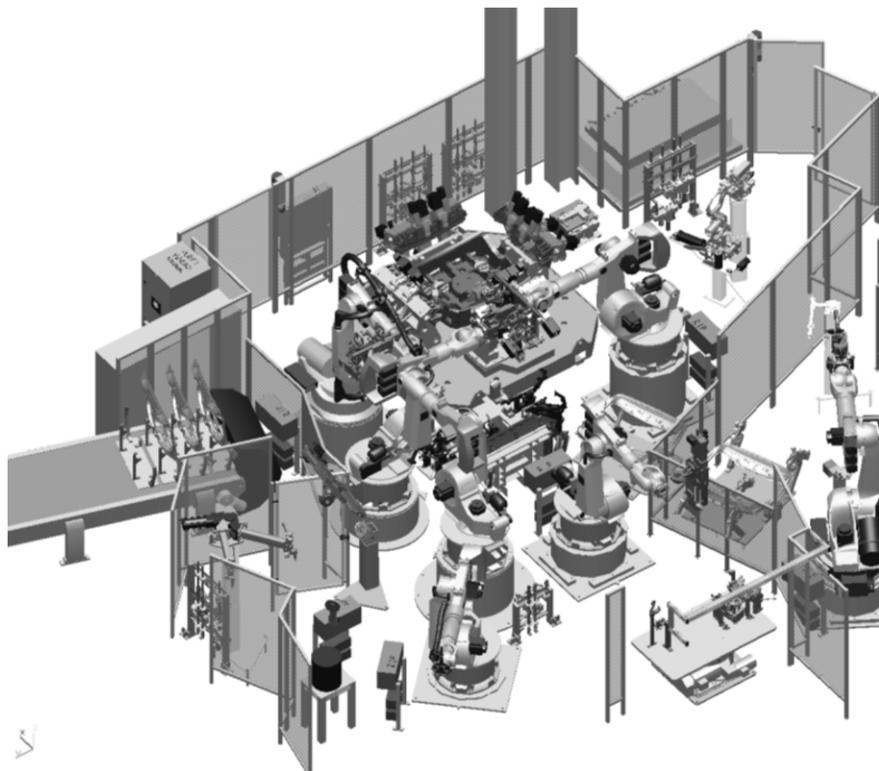


Abb. 7.26 Kinematiksimulation in einer Karosseriebauanlage (Quelle: Volkswagen AG)

Nachdem die Herstellbarkeit aller einzelnen Fügestellen bestimmt ist, wird die Fügefolge bestimmt. Dabei wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Blechteile verbunden werden. Je nach Fertigungsstückzahl, vorhandenem Platz und der Nutzung vorhandener Einrichtungen können sich dabei unterschiedliche optimale Reihenfolgen in der Verbauung der Einzelteile in den verschiedenen Werken eines Konzerns ergeben. Damit entstehen unterschiedliche Zwischenbaugruppen und Gliederungen im Strukturbau der Fertigungsstückliste.

Da Bauteile aus CFK (CFK – carbonfaserverstärkte Kunststoffe) im Verhältnis zum Gewicht ausgezeichnete Materialeigenschaften besitzen, werden in der Automobilindustrie Möglichkeiten für eine effiziente Massenproduktion von Bauteilen aus CFK gesucht. Der Einsatz der numerischen Simulation, um das mechanische Verhalten von CFK zu berechnen, ist besonders anspruchsvoll. Bracht und Jiao (2017) stellen hierzu ein Finite-Elemente-Modell zur Simulation des Drapierprozesses für CFK-

Bauteile vor. Die Validierung des Modells erfolgt über einen Vergleich von Versuchs- und Simulationsergebnissen.

Nach der Installation der Anlagen erfolgt deren Einarbeitung. Hierzu sind Musterteile aus der Einzelteilstiftigung notwendig. Daher kann die Einarbeitung erst spät im Projektlauf erfolgen und ist somit ein Schwerpunkt vor und während der Produktionsversuchsserie. Während der Einarbeitung erfolgt die Feinjustierung der Anlagen und Roboterprogramme anhand von realen Teilen. In dieser Phase zeigt sich der Erfolg der Planung mit digitalen Methoden durch wenige Anpassungen.

Eine in diesem Zusammenhang neuartige Produktionsprozessplanung variantenreicher Fahrzeugprodukte zeigt Arnhold (2013) unter Berücksichtigung von intervallbasierten Eingangsdaten auf.

7.4.3 Planung der Lackiererei

Die Lackieranlagen in der Automobilfertigung werden bei Projekten für neue Produktmodellanläufe nicht in dem Maße umgebaut, wie es bei den Karosseriebauanlagen der Fall ist. Dennoch ist die Lackplanung in die Neuanläufe involviert. Die Aufgabe der Lackiererei besteht darin, Korrosionsschutz an empfindlichen Stellen aufzubringen, die Hohlräume zu versiegeln, die Karosserie in mehreren Schichten zu lackieren und Dekorelemente anzubringen. Um die Herstellbarkeit des Produktes sicherzustellen, beginnt die Lackplanung mit Untersuchungen zur Produktanalyse und Erreichbarkeit anhand von virtuellen Produktmodellen und meldet bei Problemfällen Vorschläge zur Produktänderung (Abb. 7.27).

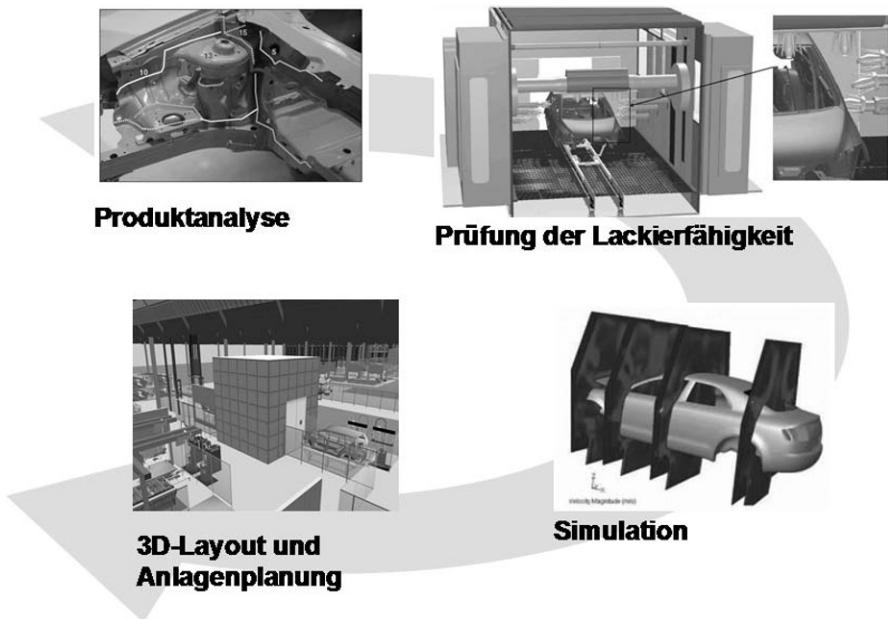


Abb. 7.27 Handlungsfelder der Digitalen Fabrik in der Lackierereiplanung

Die Grundierung geschieht in langen Tauchanlagen und Trocknern, durch welche die fertigen Karosserien gezogen werden. Bei der Einplanung neuer Produkte wird anhand der Modelle der DF z. B. geprüft, ob es bei der Durchfahrt durch die vorhandenen Anlagen zu etwaigen Kollisionen kommt.

Die Endlackierung mit dem Decklack wird ebenso wie die Aufbringung von Schutz und Versiegelung von Lackierrobotern ausgeführt. Für diese Operationen nutzt die Planung der Lackiererei die Robotersimulation mit Kinematikuntersuchungen und Offline-Programmierung in ähnlicher Weise wie die Karosseriebauplanung.

Die Simulation einzelner Detailprozesse (Abb. 7.28) auf Basis von FEM ist für die Lackierereiplanung sehr aufwendig, da die Bewegung von Flüssigkeiten zu simulieren ist. Bracht und Ritz (2016) beschreiben hierzu die digitale Absicherungsplanung einer Decklackierkabine.

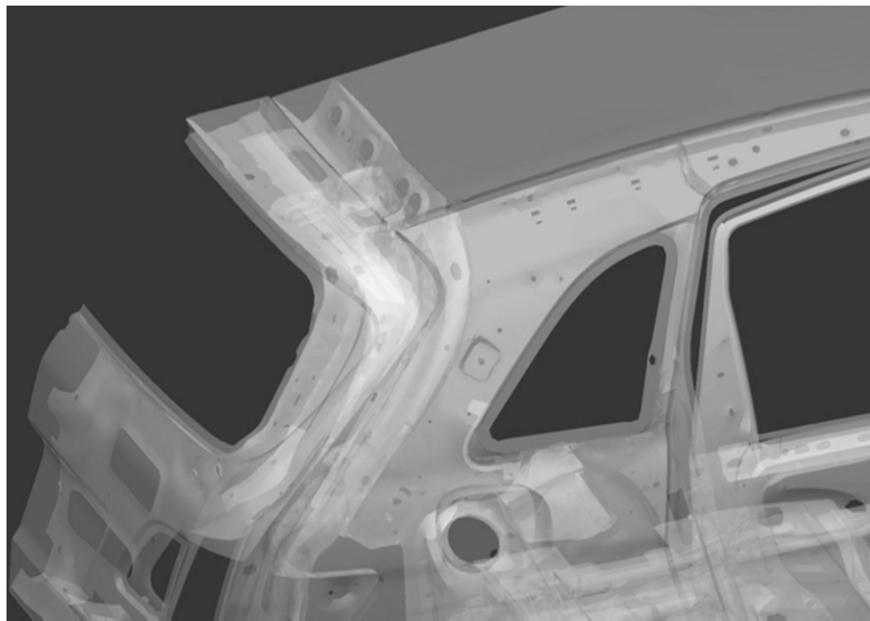


Abb. 7.28 Simulierte Luftblasen beim Tauchprozess bei einer bestimmten Stellung der Karosserie im Tauchbecken (Pfluger 2008, S. 8)

Die Untersuchungen umfassen Fragestellungen, die Tab. 7.1 in einer Übersicht zeigt:

Tabelle 7.1 Beispiele für FEM in der Lackierereiplanung

Untersuchung	Fragestellungen der Untersuchung
Kräfte-Simulation beim Tauchprozess	Diese Simulation untersucht, ob die Rohkarosse durch Kräfte während des Tauchprozesses so stark beansprucht wird, dass Verformungen auftreten können und welche Kräfte auf den Aufnahmen, Scharnieren und Halterungen liegen.
Benetzungs simulation beim Tauchprozess	Mit dieser Simulation wird überprüft, ob die Flüssigkeit alle Hohlräume während des Tauchvorganges benetzt und ob Blasen zurückbleiben. In einer zweiten Stufe wird ermittelt, welche Lackdicke während des Tauchvorgangs erreicht wird.
Wärmedurchdringung beim Trocknungsvorgang	Diese Berechnung ermittelt, ob die erforderliche Temperatur in allen Karosseriewinkeln lange genug aufrechterhalten wird, um eine vollständige Trocknung zu erreichen.
Wärmeverzug beim Trocknungsvorgang	Mit dieser Methode wird überprüft, ob es im Trockner zu so starken Wärmeausdehnungen kommt, dass sich in der Karosse Beulen bilden oder sich Teile verziehen.
Schichtdickensimulation beim Sprühauflagsverfahren	Simuliert man den Farbauftrag durch die einzelnen Tröpfchen, so lässt sich die erzielte Schichtdicke des aufgetragenen Lacks berechnen (Abb. 7.29).

In einem Beitrag von Bracht und Roller (2009) wird beschrieben, wie durch eine neue Berechnungsmethode aus dem Bereich der numerischen Strömungssimulation der komplette Aufheizprozess einer ganzen Rohbaukarosse in einem Lackiertrockner berechnet werden kann. Durch dieses Simulationsverfahren ist es möglich, das Aufheizverhalten an jedem Punkt der Karosse zu ermitteln. So kann sichergestellt werden, dass alle Lacke und Bauteile innerhalb ihres jeweiligen Prozessfensters getrocknet respektive ausgehärtet werden. Dies ermöglicht eine digitale Systemoptimierung auf Basis zukünftiger Lack- und Werkstoffanforderungen.

Die integrierte Lackierprozesssimulation an virtuellen Fahrzeugprototypen in der DF beschreibt Roller (2012) umfassend.

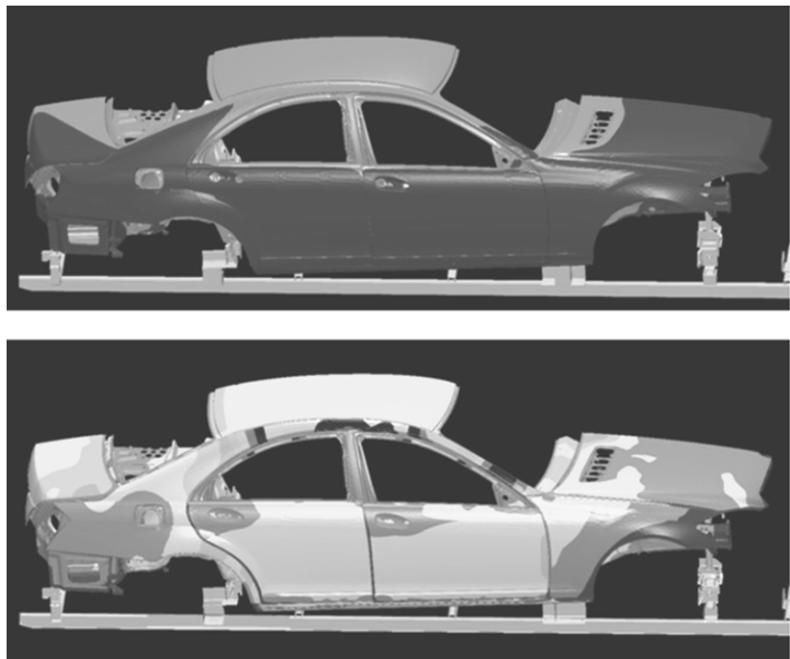


Abb. 7.29 Simulierte Schichtdickenverteilung nach der Tauchlackierung an der Außenhaut (Pfluger 2008, S. 11)

Die Simulationsverfahren der Lackierereiplanung verlangen zur Anwendung Expertenwissen. Oftmals liegen jedoch auch Erfahrungen von Vorgängerfahrzeugen vor, oder Aussagen können mit einfacheren Berechnungsmethoden in hinreichender Qualität getroffen werden. Daher werden vollständige Simulationen unter Verwendung von FEM nicht bei jeder Produktneueinplanung angewandt, sondern nur zur Untersuchung neuer Technologien und Komponenten am Produkt oder in der Fertigung genutzt.

So ist es beispielsweise bei der Verwendung neuer weicher Bleche der Motorhaube für den Fußgänger-Unfallschutz wirtschaftlicher und schneller, die mögliche Verformung beim Tauchprozess als auch die Wärmeausdehnung beim Trocknungsvorgang zu simulieren, anstatt diese Frage mit Hilfe realer Prototypen zu beantworten.

Eine völlig andere Struktur des Planungsprozesses ergibt sich bei den Infrastrukturprojekten in der Lackierereiplanung. Bei diesen Projekten wird an einem Standort eine neue Anlage aufgebaut oder eine bestehende Lackiererei auf eine neue Technologie umgerüstet. Dieser Fall trat bei-

spielsweise bei der Umstellung der Lackierereien auf wasserlösliche Lacke auf.

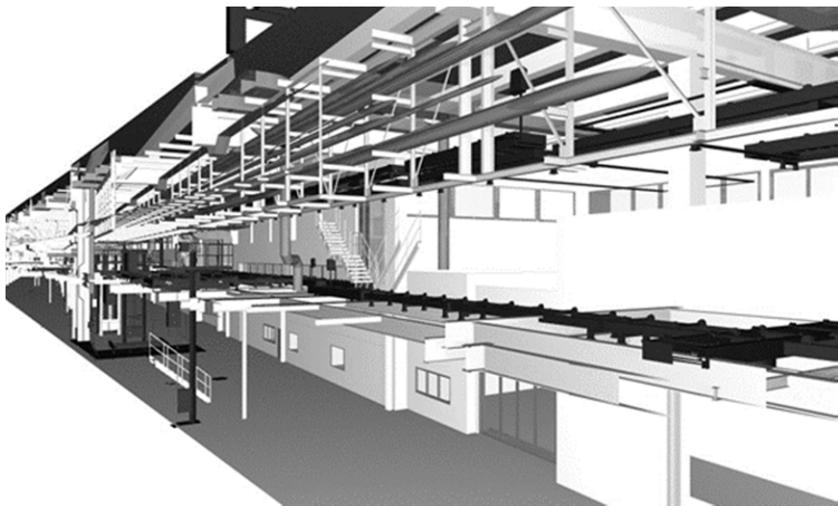


Abb. 7.30 Virtuelles Modell einer neu geplanten Lackieranlage (Quelle: Volkswagen AG)

Diese Projekte entsprechen dem aus dem Anlagenbau bekannten Projektverlauf. Hierzu werden bei der Anwendung der Methoden und Werkzeuge der DF die Layoutplanung (Abb. 7.30), die Materialflusssimulation besonders zur Auslegung von Sortierspeichern und die VR-Begehung genutzt.

7.4.4 Planung der Aggregatefertigung

Die Hauptaggregate eines Fahrzeugs wie der Motor, das Getriebe, die Achsen, das Fahrwerk sowie verschiedene Nebenaggregate, werden meist nicht spezifisch für ein Fahrzeug geplant, sondern in Form eines Baukastensystems für unterschiedliche Fahrzeuge verwendet. Diese Aggregate werden daher in eigenständigen Projekten entwickelt, die ähnlich ablaufen wie die Fahrzeugprojekte. Die Anordnung der Nebenaggregate wie Motorsteuerung, Abgasanlage, Schaltgestänge und Motorbefestigung hängt dagegen von der Situation im jeweiligen Fahrzeug ab und muss dementsprechend abgestimmt werden. Die im Wesentlichen genutzten digitalen Methoden zeigt Abbildung 7.31.

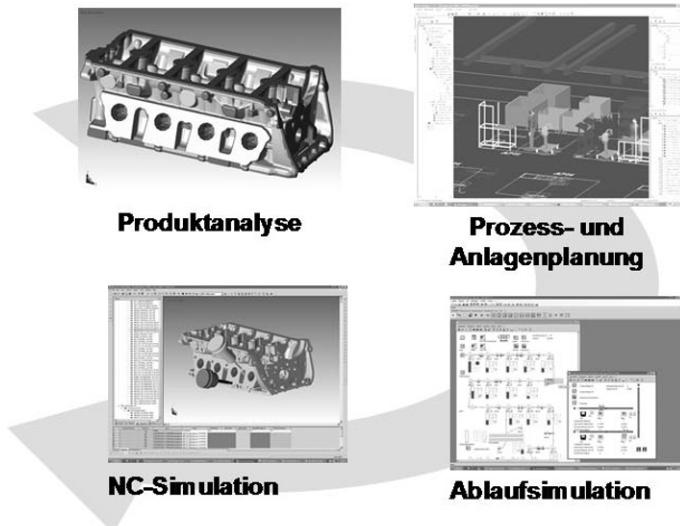


Abb. 7.31 Handlungsfelder der Digitalen Fabrik in der Aggregateplanung

Die Planung der Einzelteifertigung für die Aggregate beginnt mit der Produktoptimierung nach Fertigungsgesichtspunkten und einer begleitenden Konzeptionsplanung der Fertigung. Dabei werden zur Produktanalyse die Kollisionsprüfung und Erreichbarkeitsuntersuchung genutzt (Abb. 7.32).

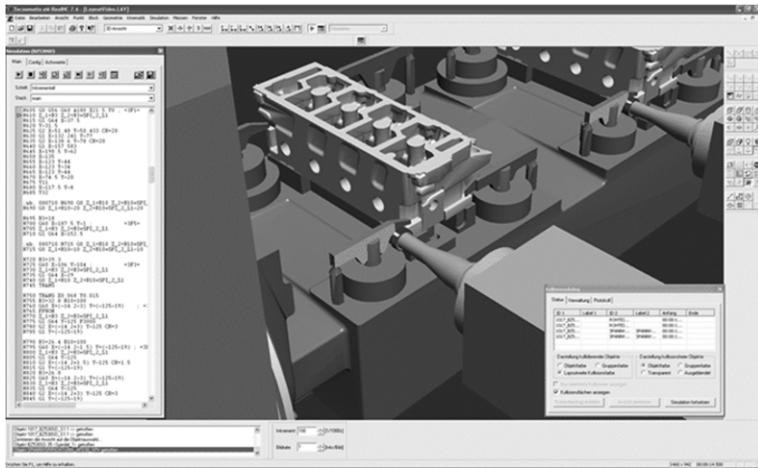


Abb. 7.32 Kollisions- und Kinematikuntersuchung sowie Offline-Programmierung bei der spanenden Bearbeitung (Quelle: Volkswagen AG)

Nach der Übernahme der Konstruktionsunterlagen beginnt die Detailplanung, in der zunächst die erforderlichen Arbeitsfolgen für die Fertigung jedes Teils festgelegt werden. Während bei den Blech- und Kunststoffteilen Umformverfahren und Gießtechniken eingesetzt werden, kommen im Einzelteilbau für die Aggregate Urformverfahren, spanende Fertigungsverfahren und zwischengeschaltete Härteprozesse hinzu.

Nach der Festlegung der Arbeitsfolgen werden die Fertigungsanlagen und Betriebsmittel jeweils für eine Teilefamilie in Form von Fertigungsstraßen geplant. Die Kinematiksimulation und Offline-Programmierung verkürzen dabei die Planungszeiten. Je nach Stückzahlauslegung können diese Straßen unterschiedliche Varianten eines Teils in variablen Losgrößen fertigen.

Den Einsatz der Simulation zur kontinuierlichen Verbesserung der Prüfprozesse im Rahmen der Aggregatefertigung zeigt Bethke (2005) ausführlich auf.

7.4.5 Planung der Fahrzeugendmontage

Im Projektablauf der Montageplanung (Abb. 7.33) für ein neues Fahrzeug steht zunächst die Produktoptimierung im Vordergrund. Hierzu werden mit dem DMU die Montagefähigkeit des Fahrzeugs und unter Verwendung von Betriebsmittelmodellen die Montageprozesse auf Kollisionen und Erreichbarkeit untersucht.

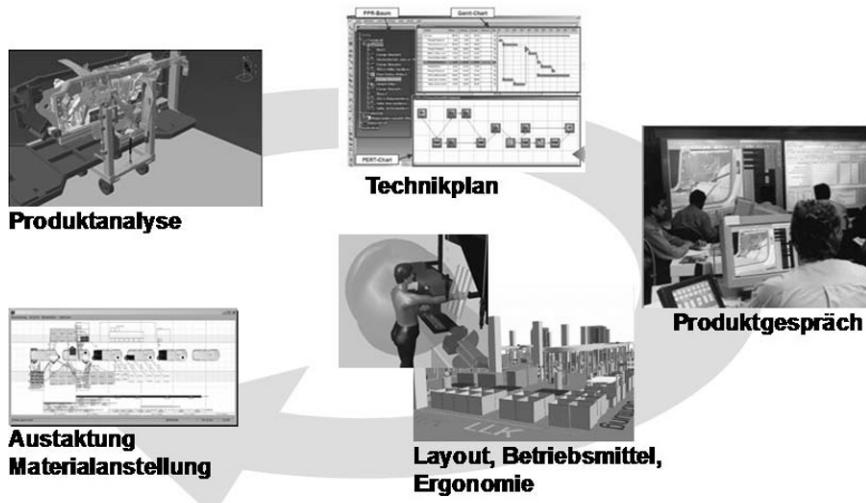


Abb. 7.33 Handlungsfelder der Digitalen Fabrik in der Planung der Fahrzeugendmontage

Auf dieser Basis wird der Technikplan des Fertigungsprozesses erstellt. Er legt die logische Baureihenfolge des Montageablaufes fest und bestimmt damit die grobe Reihenfolge der Arbeitsstationen am Band. Zudem wird in dieser Phase festgelegt, mit welchen Fügeverfahren und Hilfsmitteln der Einbau erfolgt.

Das Produktgespräch (Abb. 7.34) erfolgt in einem Multi-Projektionsraum. In diesem können auf mehreren Projektionen gleichzeitig Daten des Produktes und des dazugehörigen Fertigungsprozesses angeschaut werden. Während der Gespräche wird der gesamte Montageprozess mit jeder einzelnen Arbeitsfolge betrachtet. Dabei wird geprüft, ob die geforderten Prozessparameter erreicht werden können, ob die geplante Reihenfolge des Ein- und Anbaus der Komponenten möglich ist, ob die geplanten Betriebsmittel einsetzbar sind und ob der geplante Prozess ergonomisch durchgeführt werden kann. Im Bedarfsfall wird eine vorbereitete Montagesimulation vorgestellt oder direkt während des Gesprächs durchgeführt.

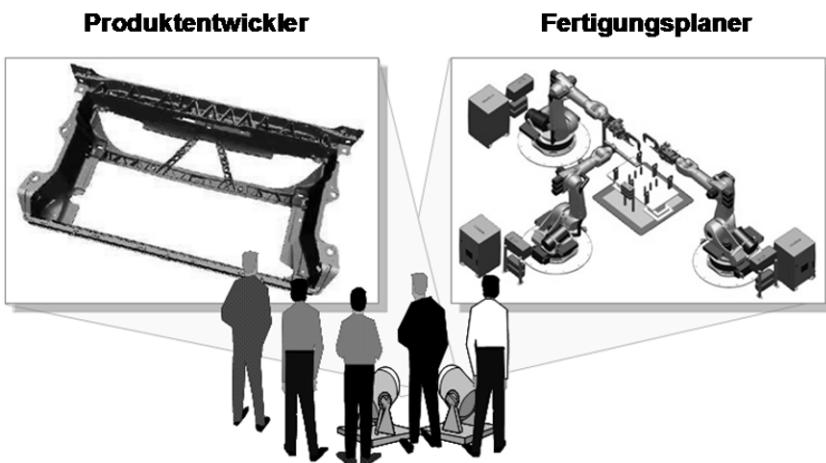


Abb. 7.34 Produktgespräch unter gemeinsamer Betrachtung der Konstruktion und des Montageprozesses (Quelle: Volkswagen AG)

Auf diese Weise wird die Montage jedes Einzelteils und jeder vormontierten Baugruppe im Endprodukt abgesichert. Eventuell erkannter Änderungsbedarf am Produkt oder Fertigungsprozess wird sofort dokumentiert und die erforderlichen Maßnahmen werden während des Gespräches abgestimmt. Übersteigen die erforderlichen Maßnahmen den Kompetenzrahmen der Beteiligten, wird ein Änderungsantrag an das Projektmanagement formuliert.

Einen besonderen Schwerpunkt bilden die automatisierten Arbeitsplätze. Sind sie einmal festgelegt, stellen sie Fixpunkte in der Struktur des Montagebandes dar. Die Abläufe werden ähnlich wie in der Karosseriebauplanung mittels einer Kinematiksimulation geplant (Abb. 7.35). Die Planungsergebnisse werden an einen Lieferanten übergeben, der die Arbeitsplätze im Detail konstruiert und offline programmiert.

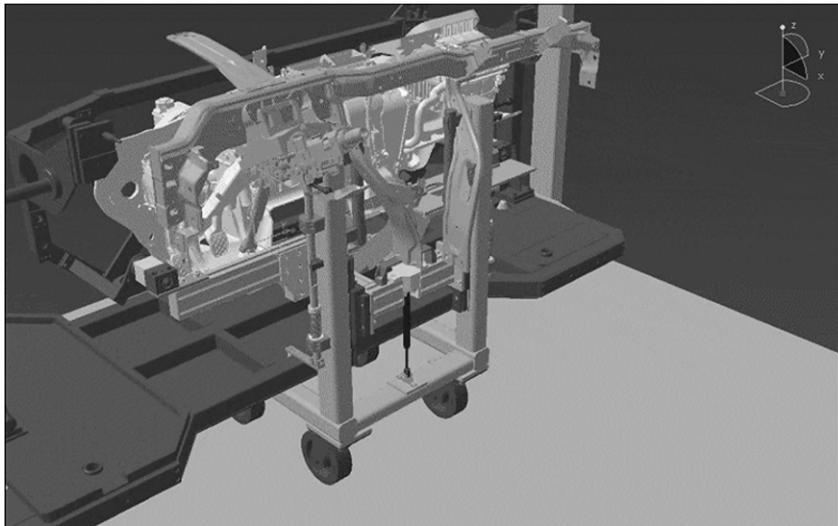


Abb. 7.35 Spezialbetriebsmittel für den Cockpитеinbau (Quelle: Volkswagen AG)

„Im Zuge von Industrie 4.0 muss das IE [Industrial Engineering] nicht mehr von veralteten Daten auf den Ist-Zustand der Fabrik schließen, sondern kann ausgehend von Echtzeitdaten in die Zukunft blicken“ (Kühn und Köhler 2015, S. 11).

Für die manuellen Arbeitsplätze erfolgt eine ergonomische Ausplanung, in der die Bewegungsabläufe, die körperlichen Belastungen der Werker sowie die zurückgelegten Wege bei der Verfolgung der Fahrzeuge am Band und der Versorgung der Station mit Material berücksichtigt werden. Dabei wird meist auf Erfahrungswerte in Tabellenform zurückgegriffen. An kritischen Stellen erfolgt eine Ergonomiesimulation.

Besonders wichtig in der Fahrzeugendmontage ist die gleichmäßige Verteilung der Arbeitsinhalte auf die Stationen eines Bandes (Austaktung oder Bandabgleich). Durch die unterschiedlichen Ausstattungsvarianten verändern sich die Arbeitsinhalte von Fahrzeug zu Fahrzeug. Daher wird in Simulationsläufen mit einem unterschiedlichen Produkt- und Ausstattungsmix ein Kompromiss gesucht. Basis ist hierbei eine Prognose des Vertriebs über die zu erwartende Verteilung der verschiedenen Varianten.

Die Gestaltung der Arbeitsplätze wird nach Abschluss der Planung von einem Gremium aus Werksleitung, betroffenem Arbeitsteam, Betriebsrat und Gesundheitswesen abgenommen. Hierfür werden einzelne Arbeitsplätze häufig in einer Versuchshalle aufgebaut, in der auch die Einweisung und das Training der Werker erfolgen. Die Anzahl der Arbeitsplätze in der

Versuchshalle kann durch CAD-Arbeitsplatzmodelle und deren virtuelle Begehung wesentlich reduziert werden.

Der Anbau der Kleinteile wird am Schluss geplant. Die letzte Ausbalancierung der Stationen geschieht erst während der Vorserienfertigung in direkter Abstimmung mit den betroffenen Arbeitsteams am Band (Abb. 7.36). Die weitere Abstimmung und Anpassung der installierten Einrichtungen übernehmen dann nach der Übergabe beim Serienanlauf die Arbeitsteams in Eigenregie in Form eines KVP.

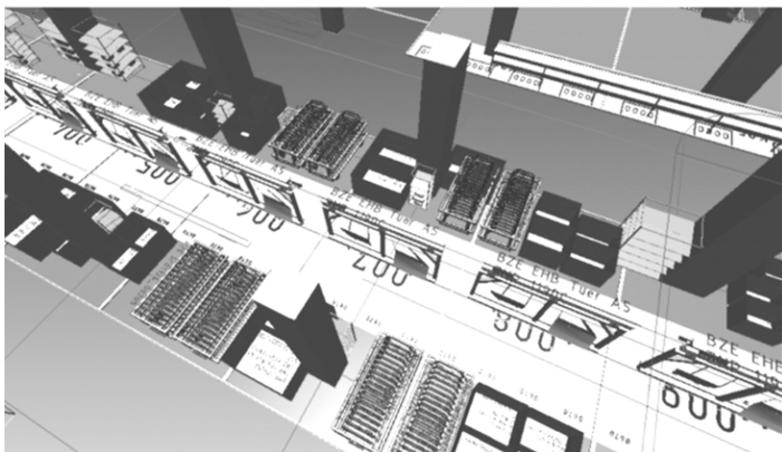


Abb. 7.36 Positionierung der Behälter entsprechend den Arbeitsfolgen an einem Montageband (Quelle: Volkswagen AG)

Während des gesamten Planungsablaufs unterliegt der Montageplan aufgrund der immer feineren Planungs- und Verbesserungsschritte einer Vielzahl an Änderungen. Hinzu kommen Änderungsvorgaben aus der Produktentwicklung sowie Verschiebungen in der Vertriebsprognose. Diese können Modifikationen im Montageablauf und Anpassungen der Ausbalancierung notwendig machen. Gerade hierbei zeigt sich der Vorteil der digitalen Fabrikmodelle, weil die Auswirkungen schneller überblickt, ausgeplant und abgestimmt werden können.

Parallel zur Planung des Montageprozesses erfolgt die Planung der Teileversorgung in mehreren Ebenen (Abb. 7.37) von „Innen nach Außen“. Für jedes Teil werden neben dem eigentlichen Einbauprozess auch die Bewegungen des Workers an dem Fahrzeug und zur Positionierung der Teile geplant. Diese Zeitanteile fließen in die Fertigungszeit ein und sind auch Bestandteil des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses an der laufenden Linie.

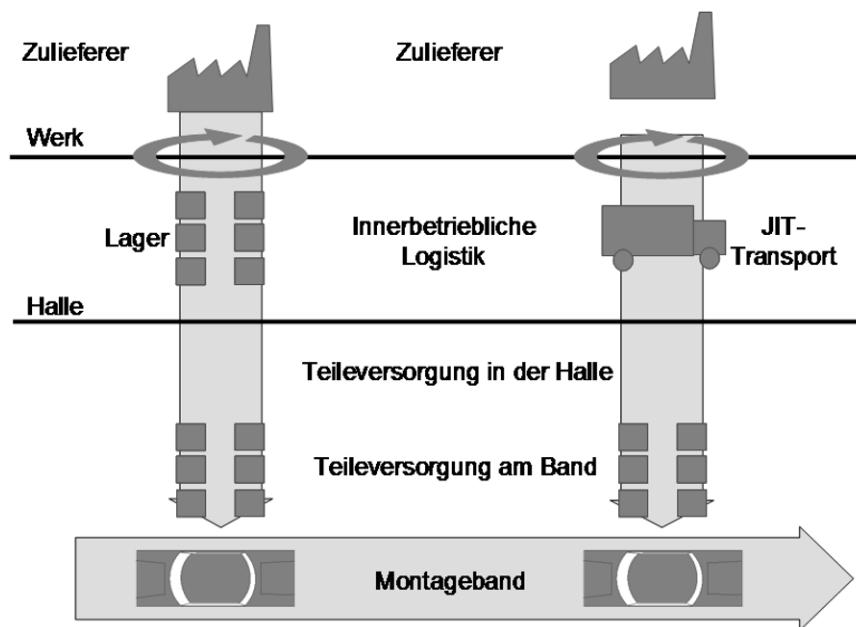


Abb. 7.37 Planung des Montagebandes und die damit verbundene Planung der Logistikkette (Legende: JIT – Just-In-Time) (Quelle: Volkswagen AG)

Zur Gewährleistung der sicheren Teilebereitstellung am Band erfolgt eine sorgfältige Planung der Logistikprozesse auf Basis einer übergeordneten Logistikstrategie. Diese betrachtet die gesamte Prozesskette vom Teilelieferanten bis zum Verbauort unter dem Gesichtspunkt minimaler Bestände und Handhabungsvorgänge. Je nach Volumen und Variantenzahl werden für die Verbauteile innerbetriebliche Zwischenlager, eine JIT- (JIT – Just-In-Time) oder JIS- (JIS – Just-In-Sequence) Belieferung vorgesehen.

7.4.6 Übergreifende Nutzung von Daten

Zahlreiche Themen der DF spielen in der Automobilfertigung eine übergreifende Rolle über mehrere Gewerke. Deren Bedeutung für die Effizienz der Planungsabläufe wird erst dann sichtbar, wenn die Methoden und Werkzeuge der DF in einem integrierten Konzept miteinander abgestimmt sind. Dazu gehören insbesondere gemeinsame Datenstrukturen und wohl definierte Schnittstellen, in mehreren Gewerken einsetzbare Simulationsmethoden sowie zahlreiche Methoden der Prozess- und Organisationsgestaltung. Die Untersuchungen können mit einem Data Mining in der Bedarfsprognose von Komponenten und Teilen (Holtze 2000)

beginnen und bis zu Analysen des Produktionsmanagements nach dem Vorbild von Toyota reichen (vgl. Oeltjenbruns 2000). Dieser ganzheitliche Nutzen wird z.B. besonders bei Badge-Engineering-Kooperationen deutlich (Bracht und Barz 2011). Beim Badge-Engineering wird ein gleiches oder ähnliches Produkt unter verschiedenen Markennamen (Badge) angeboten.

Die besondere Wirkung entsteht durch das Konzept der DF, wenn es den Planern ermöglicht wird, eine ganzheitliche Planung von Produkt, Prozessen und Ressourcen übersichtlich und effizient durchzuführen. Hierfür sind nicht nur anschauliche und einfach zu bedienende, grafische Oberflächen sowie effiziente Simulationsprogramme erforderlich, sondern alle einzusetzenden IT-Programme müssen auf kompatiblen Daten basieren. Die Kerndaten dabei sind die Produktstücklisten, die Prozesspläne sowie die Strukturen der Ressourcen (Abb. 7.38).

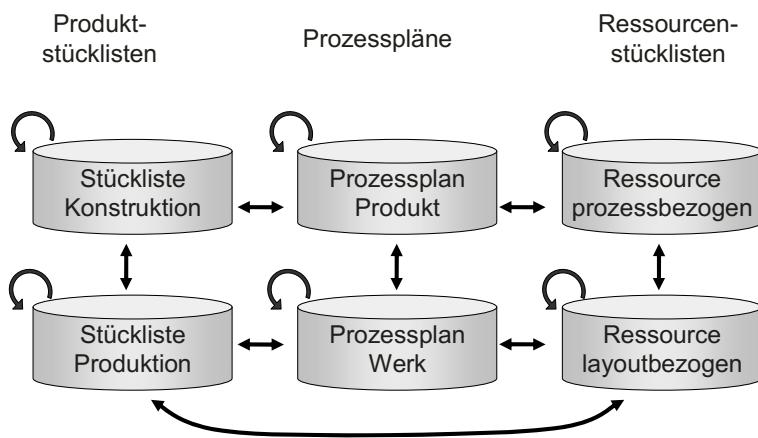


Abb. 7.38 Verbindungen von Produktstücklisten, Prozessplänen und Ressourcenstücklisten

Dieser Datenverbund ist in seinem Gesamtzusammenhang hoch komplex, da die einzelnen Datenbestände in unterschiedlichen Kombinationen zuverlässig miteinander vernetzt werden müssen. Die einzelnen Datengruppen sind ihrerseits in sich hierarchisch aufgebaut (angedeutet durch die runden Pfeile an den Datentöpfen). Um unterschiedliche Funktionen zu erfüllen, werden die Daten mit jeweils angepassten Strukturen in mehrfacher Ausführung abgebildet (dies ist hier vereinfacht durch je zwei übereinander dargestellte korrespondierende Datentöpfe abgebildet).

Die Produktinformationen werden über Produktstücklisten strukturiert und gegliedert. An diesen hängen Verweise zu den CAD-Modellen, Beschreibungen, Materialangaben, Fertigungsangaben und weitere Informati-

onen, die das Produkt vollständig beschreiben. Die Stückliste in der Automobilindustrie ist sehr komplex, da sie eine große Teilezahl zueinander in Verbindung setzt, sehr viele Bauteile in mehreren Varianten angeboten werden, die Fahrzeuge in hoher Stückzahl gefertigt werden und die Bauteile ständig Änderungen aufgrund des technischen Fortschritts und der sich wandelnden Marktanforderungen unterliegen (vgl. auch Barz 2012).

Um diesen Anforderungen zu genügen, wurde für die Automobilindustrie eine besondere Form der Variantenstrukturstückliste entwickelt. Bei dieser logistischen Stückliste werden die Teile nicht direkt dem Strukturbau, sondern zunächst einer Verwendungsstelle wie z. B. dem Sitz oder dem vorderen linken Federbein zugewiesen (Abb. 7.39). Dieser Verwendungsstelle werden dann die verschiedenen Varianten (Ausführungen) zugeordnet. Im Zuge der Entwicklung des Produktes unterliegen die einzelnen Teile unterschiedlichen Weiterentwicklungen, so dass neue Versionen entstehen. Die Sequenz dieser Versionen wird ebenfalls in der Verwendungsstelle eindeutig mitgeführt.

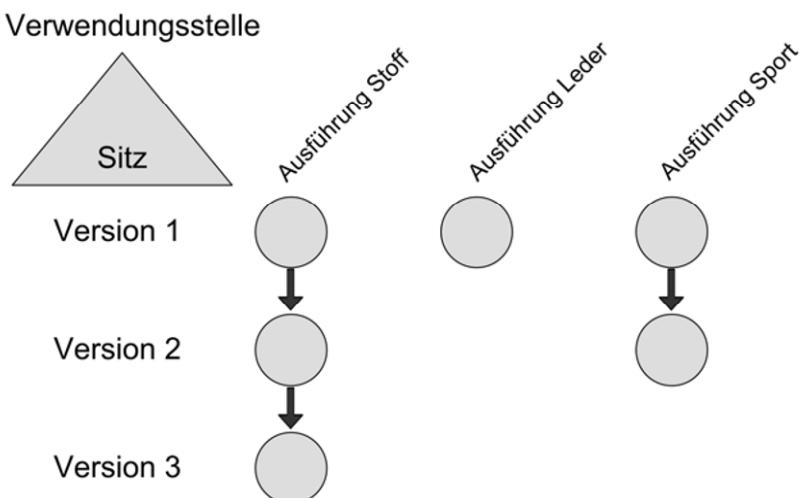


Abb. 7.39 Organisation einer Verwendungsstelle für verschiedene Ausführungen einer Stücklistenposition und der historischen Sequenz ihrer Versionen (Quelle: Volkswagen AG)

Mit dieser Gliederung erhält die Stückliste einen neuen Ordnungsgrad. Die Entwicklungsstückliste wird über die Verwendungsstellen aufgebaut, die einzelnen Bauteile, Komponenten oder Module den Verwendungsstellen zugeordnet. Auf diese Art kann auf einfache Weise eine neue Variante hinzugefügt werden. Die Historie der einzelnen Versionen ist durch ihre

Änderungssequenz eindeutig nachzuvollziehen. Damit können die Fertigung und die Logistik zuverlässig alle Ausführungen der gewünschten Bauteile jedes einzelnen Fahrzeuges bestimmen, indem aus jeder Verwendungsstelle das entsprechende Bauteil ausgewählt wird.

Diese Stücklistenform entspricht aber nicht der Arbeits- und Denkweise der Produktentwickler. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Der Entwickler der Beleuchtungsanlage betrachtet die zugehörigen Komponenten bestehend aus Lichtschaltern, Sicherung, Kabeln und Glühbirnen in ihrem funktionalen Zusammenwirken. Dazu kann er die Komponenten auf einem speziellen Arbeitsbrett oder in einer CAD-Datei zusammenfassen und untersuchen. Die logistische Stückliste fasst die Einzelteile jedoch nach den Modulen der Montage zusammen, wie z. B. Frontscheinwerfer, Armaturen Brett oder Kabelbaum. Nach dieser Modulstruktur der logistischen Stückliste wird das Gesamtprodukt bei der Bestellung, Disposition und Fertigung der Module betrachtet.

Der Entwickler arbeitet daher zunächst mit der Struktur der Entwicklungsstückliste, welche das Produkt nach funktionalen und konstruktiven Einheiten gliedert. Im weiteren Prozess (Abb. 7.40) werden diese Informationen zur Fertigungsvorbereitung in die Fertigungs- und Dispositionseinheiten der logistischen Stückliste umgewandelt. Dabei werden die Stücklisten um alle fertigungsspezifischen Daten und die präzisen Beschreibungen der einzelnen Ausführungsvarianten ergänzt.

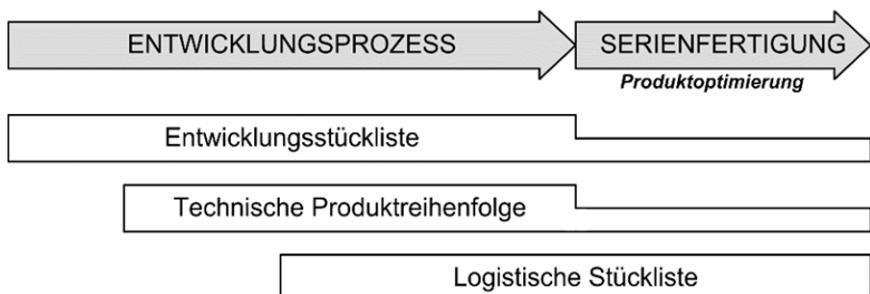


Abb. 7.40 Abfolge der Entstehung von Entwicklungsstückliste, technischer Produktreihenfolge und logistischer Stückliste

Die Produktionsplanung und damit auch die Methoden und Werkzeuge der DF haben im Zuge des Frontloading (vgl. Abschnitt 3.1.1) die Aufgabe, die produktbezogenen Daten der Entwicklungsstrukturen bis zur Serienfertigungsphase des Produktes auf die Strukturen der logistischen Stückliste umzustellen.

Als Bindeglied zwischen beiden Ausführungsformen der Stückliste dient die sogenannte technische Produktreihenfolge (TPR). Sie gliedert die einzelnen Bauteile und funktionalen Module der Entwicklung in die Aufbaureihenfolge des Produktes, berücksichtigt aber noch nicht die auf Basis der Beschaffung und Logistik festgelegten Module der logistischen Stückliste. Die TPR definiert z. B., dass für den Aufbau der Karosserie zuerst der Boden des Fahrzeuges gefertigt wird, an den dann die Seitenteile angebracht und danach das Dach und weitere Teile angefügt werden. Im Endmontageprozess legt die TPR z. B. fest, dass im Fahrerraum zuerst die Kabel verlegt werden müssen, bevor das Armaturenbrett verbaut werden kann. Fügt man die CAD-Daten der Einzelzeile in der Reihenfolge der TPR virtuell als DMU zusammen, so erhält man die einzelnen Baustadien des Fahrzeuges in der montagetechnisch bedingten Reihenfolge (Abb. 7.41).

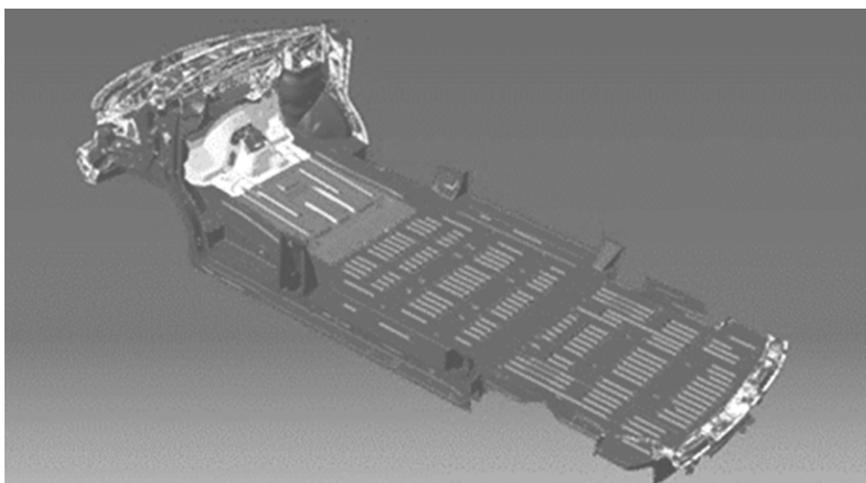


Abb. 7.41 Aus einer TPR abgeleitetes DMU eines Bauzustandes (Quelle: Volkswagen AG)

Bei jeder Baustufe kann dabei überprüft werden, ob die Komponenten wie geplant wirtschaftlich fügbar und verbaubar sind und mit den vorgesehenen Betriebsmitteln erreicht werden können.

Die TPR ist im weiteren Verlauf der Planung die Basis für die Entwicklung der Prozesspläne (Abb. 7.42). Bei der Ausplanung werden die einzelnen Arbeitsfolgen technisch beschrieben und die Zeiten berechnet. Dabei wird das Produkt werksneutral betrachtet, wenn es an mehreren Standorten gefertigt werden soll. Dieser allgemeine Prozessplan wird im Folgenden

als Produktplan bezeichnet. Wird das Produkt dann auf eine Fertigungsline eines spezifischen Werkes eingeplant, wird der dazugehörige Prozessplan als Linienplan bezeichnet.

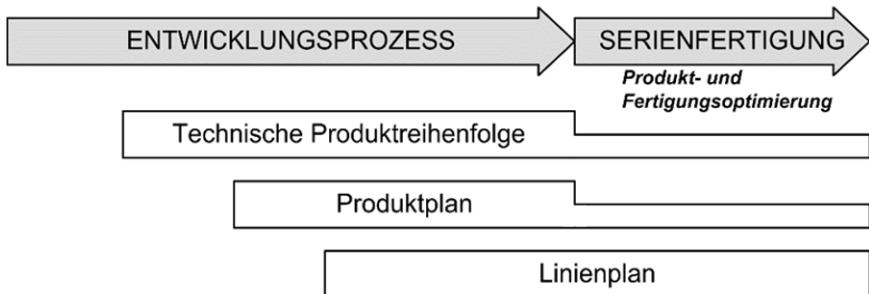


Abb. 7.42 Technische Produktreihenfolge, Produktplan und Liniensplan in der Abfolge des Entwicklungs- und Planungsprozesses

Der Produktplan beschreibt den technischen Fertigungsprozess eines Produktes. Dabei werden nur die direkten Arbeitsfolgen am Produkt wie die Verrichtungsdauer oder produktbezogene Prüfvorgänge berücksichtigt, die durch die technische Auslegung des Produktes bedingt sind. Die zusammengefassten Zeiten ergeben die EHPV (Engineered Hours Per Vehicle) und können als Benchmark-Werte mit anderen Produkten herangezogen werden.

Im Produktplan wird vorgegeben, zu welchen Arbeitsschritten welche Betriebsmittel für den jeweiligen Fertigungsschritt aus technischer Sicht erforderlich sind. Dies sind z. B. Umformwerkzeuge, Spezialschneidwerkzeuge bei spanender Fertigung oder Schweißvorrichtungen und Schraubvorrichtungen bei Fügeprozessen.

Im weiteren Planungsprozess wird der Produktplan zum standortspezifischen Liniensplan ergänzt. Dieser enthält alle weiteren Anteile der Fertigungszeit, wie Rüstzeiten, Wegezeiten und Vorbereitungszeiten, die in Summe zur gesamten Fertigungszeit des Produktes führen. Dabei wird auch der vom Lohngefüge des Standortes sowie von der geplanten Stückzahl abhängige Mechanisierungsgrad berücksichtigt.

Im Liniensplan werden alle im Fertigungsprozess benötigten Ressourcen aufgeführt, dies sind z. B. die Betriebsmittel aus dem Technikplan und darüber hinaus Werkzeuge, Prüfmittel, Behälter und Regale zur Gestaltung des vollständigen Fertigungslayouts.

Die technische Produktreihenfolge orientiert sich an den technischen Notwendigkeiten und hat das Ziel, den DMU für Einbauversuche zu visualisieren.

lisieren. Im Planungsprozess (Abb. 7.43) wird diese Information zunehmend nach Produktionsaspekten weiter detailliert. Zunächst werden die Grenzbereiche für den Einbau festgelegt; sie geben an, ab welcher Zusammenbausituation ein Bauteil frühestens verwendet werden kann und wann es spätestens verbaut sein muss. Mit diesen Angaben wird ein zeitlicher Spielraum definiert, der einen Taktausgleich zur Verteilung der Arbeitsfolgen im Fertigungsprozess möglich macht.

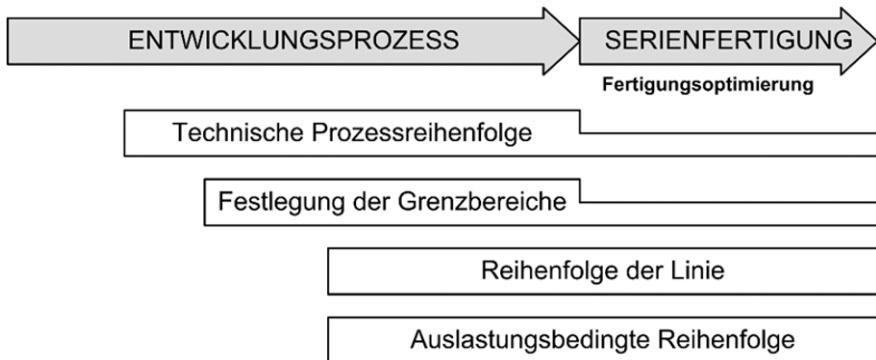


Abb. 7.43 Entwicklungsablauf der Produktreihenfolge im Fertigungsprozess

Bei der Erstellung des Linieneplanes erfolgt die Festlegung der Fertigungsreihenfolge für die vorgesehene Fertigungslinie innerhalb der definierten Grenzen. Während der Fertigung kann die Fertigungsreihenfolge im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses umgestellt werden, oder wenn sich z. B. durch eine veränderte Nachfrage nach bestimmten Ausstattungsmerkmalen neue Rahmenbedingungen für eine Ausbalancierung der Bandauslastung ergeben.

Der Planungsprozess der Ressourcen teilt sich in zwei Stränge (Abb. 7.44), die in zwei unterschiedlichen Gliederungsebenen geplant werden. Die im Layout dargestellten Ressourcenelemente orientieren sich nach der Lage im Raum.

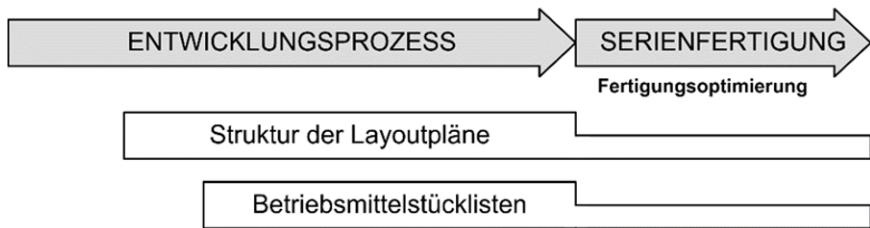


Abb. 7.44 Entwicklungsablauf der Ressourcenstrukturen mit Layoutplänen und Betriebsmittelstücklisten.

Sie werden zur Datenverwaltung in sogenannten Layer oder Planungsebenen strukturiert. Diese Layer beschreiben auf jeweils einer Ebene Gebäude, Einrichtungen, Maschinen und Anlagen. Sie sind zum größten Teil selbst wieder in Baugruppen aus einzelnen Komponenten gegliedert und werden mit Betriebsmittelstücklisten in einer zweiten Gliederungsebene strukturiert.

Die Layoutpläne gliedern sich zunächst in einzelne Hallen, Gebäude und Freiflächen eines Werkes. Diese bilden das Flächenraster für die anderen Ebenen des Layouts. Lüftungsleitungen, Anlagen oder auch Sicherheitseinrichtungen werden jeweils auf weiteren Ebenen der Layouts mit Bezug auf das Flächenraster modelliert. Um die Werkzeuge der DF mit den Layoutdaten einzelner Anlagen zu versorgen, entsteht eine neue Gliederung, bei der die Flächenelemente eines Fertigungsbereichs mit den grafischen Elementen aller betroffenen Ebenen des Layoutplans herausgefiltert werden können, um sie dann über eine Schnittstelle an das betroffene System zu Detailplanungen weiterzugeben.

Die Stücklisten der Betriebsmittel, Anlagen und technischen Gebäudeausrüstung werden meist in der Form einer klassischen Einzelstückliste aufgebaut.

Zur Reduzierung der Datenmenge der 3D-Layoutpläne hat es sich bewährt, für die Betriebsmittel je nach Einsatzfall verschiedene Genauigkeitsstufen der Darstellungsformen zu wählen. So ist für die Konzeptplanung eine grobe schematische Umrissdarstellung des Einrichtungstyps hinreichend. Während der Feinplanung kommt eine detaillierte Ansicht der Außenhülle zum Einsatz. Für kinematische Untersuchungen wird ein Modell der Außenhülle mit kinematischen Eigenschaften benötigt. Für die konstruktiven Berechnungen ist ein vollständiges Volumenmodell erforderlich, welches für statische und dynamische Belastungsberechnungen herangezogen werden kann.

Für viele Werkzeuge ist es sinnvoll, wenn zwischen den verschiedenen Darstellungsformen umgeschaltet werden kann. Dies wird dadurch er-

reicht, dass man die verschiedenen Modellformen an derselben Stelle platziert und je nach Bedarf die erforderlichen Modelle ein- oder ausblendet.

7.4.7 Prozessoptimierungen und Änderungsmanagement

Die Nutzung der Methoden und Werkzeuge der DF erlaubt es im Zuge des Frontloading (siehe Abschnitt 3.1.1), die Bearbeitung von Einzelaufgaben im Prozess zeitlich früher durchzuführen als ohne IT-Einsatz. Daraus ergibt sich eine Häufung zahlreicher Aktivitäten in der frühen Prozessphase (Abb. 7.45). Um diese Phase zu beherrschen, ist eine permanente Abstimmung der Aufgaben erforderlich. Diese wird mit einem durchgängigen Daten- und Änderungsmanagement unterstützt. Darüber hinaus ergeben sich durch die digitale Bearbeitung zusätzlich neue Chancen zur Verbesserung von Prozessdetails. Hierzu zählen beispielsweise die Einführung neuer Kommunikationsformen oder die Umsetzung neuer Wege zur ganzheitlichen Bearbeitung komplexer Zusammenhänge. Damit wird der gesamte Prozess transparenter und robuster.

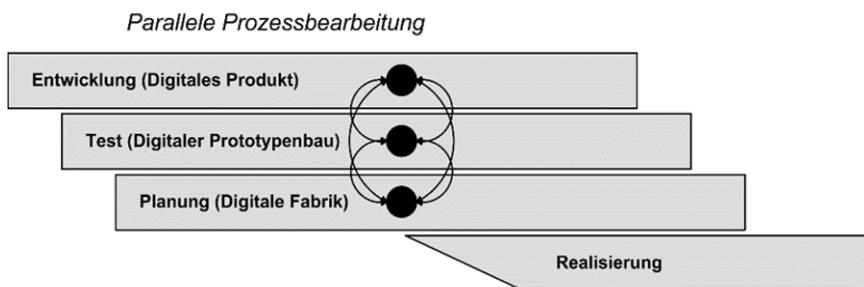


Abb. 7.45 Parallele Prozessbearbeitung in der frühen Projektphase bei Nutzung digitaler Methoden (Quelle: Volkswagen AG)

Die synchrone Bearbeitung von Daten zu einem Zeitpunkt durch mehr als einen Nutzer ist mit heutigen CAD-Systemen nicht möglich. Daher kann nur eine annähernd parallele Verarbeitung über Datenmanagementfunktionen oder Kollaborationswerkzeuge unterstützt werden.

Eine mögliche Vorgehensweise ist, dass mehrere Anwender wechselseitig oder in vereinbarten Bearbeitungsfolgen auf die Daten zugreifen, wie z. B. auf die CAD-Daten des Produktes, einen Prozessplan oder das Layout, und die Resultate ihres jeweiligen Beitrags in den Datenbestand zurückspielen. Diese Art der Bearbeitung kann mit einem größeren Zeitverzug verbunden sein. Eine andere Vorgehensweise ist der direkte Wechsel

des Bearbeitungszugriffs in einem persönlichen Dialog. Über Kollaborationswerkzeuge lassen sich Bearbeiter weltweit verteilt an verschiedenen Standorten zuschalten und sie können parallel zur Datenbearbeitung per Telefon kommunizieren.

Häufiger jedoch ist die Bearbeitung einer Teilaufgabe so organisiert, dass jeweils ein Entwickler oder Planer für eine bestimmte Datenmenge zuständig ist, und andere indirekt auf diesen Datenbestand zugreifen, um darauf aufbauend ihre Detailplanungen vorzunehmen. In diesem Fall nutzen sie eine Kopie der Ursprungsdaten in ihrem jeweiligen Spezialsystem. Ihre Ergebnisdaten geben sie an den nächsten Bearbeiter weiter oder spielen sie wieder in das Quellsystem zurück.

Bei der Bearbeitung ist in jedem Fall eine sorgfältige Regelung der Zugriffsrechte, eine Verwaltung des Datenbearbeitungszustandes, ein Versionsmanagement sowie eine Dokumentation des Bearbeitungsstandes erforderlich, damit für alle an der Planung Beteiligten jederzeit Transparenz und Konsistenz hinsichtlich des vorliegenden Datenstandes besteht.

Eine umfassende Vorgehensweise sowie informationstechnische und organisatorische Lösungen bei der Zusammenarbeit mit Fremdfirmen zur Planung und Änderung von Anlagendaten im Rahmen der DF zeigen Bracht et al. (2009) auf.

In kleinen Teams können Vorgänge, wie der in Abbildung 7.46 grob umrissene Freigabeprozess für einen Fertigungsplan, mit bilateralen Absprachen und einfachen Regelungen geklärt werden. Dabei muss der Prozessablauf nicht unbedingt schriftlich fixiert werden; er ergibt sich häufig aus der Selbstverständlichkeit des Vorgehens. Bei größeren Organisationen ist für solche Routineprozesse eine eindeutige Festlegung hilfreich. Zur Dokumentation und internen Prozessabsicherung können Formulare verwendet werden, in denen die einzelnen Vorgänge beantragt und bestätigt werden.

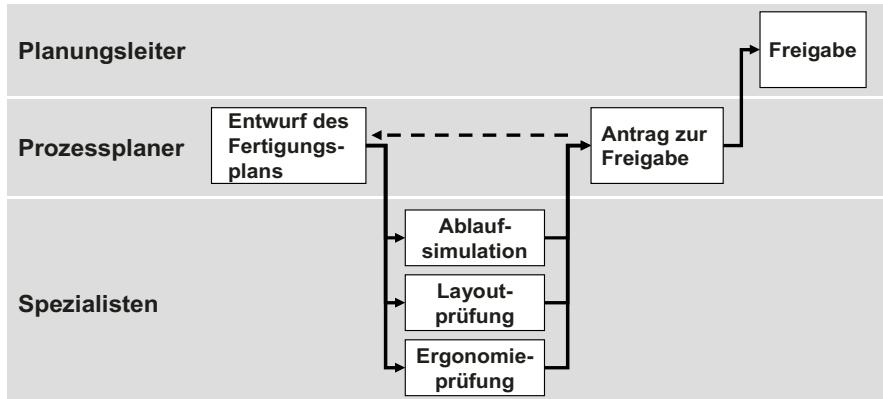


Abb. 7.46 Beispiel für einen Freigabeprozess

Werden die Werkzeuge zur Modellierung, Simulation und Optimierung sowie zur Datenhaltung um Workflowmanagementsysteme ergänzt, können die einzelnen Prozessschritte von diesem System gesteuert und die Beteiligten beispielsweise mittels E-Mail über die anfallenden Aufgaben informiert werden. So können die Transparenz in den Prozessabläufen und eine termingerechte Abarbeitung sichergestellt werden (Scheffler 2009).

Änderungen am Produkt können die in Abb. 7.47 aufgeführten internen oder externen Ursachen haben und sowohl das geplante Produkt, den Fertigungsprozess als auch die Ressourcen betreffen. Änderungen nach der Freigabe eines Planungsstandes unterliegen dem Änderungsmanagement. Dabei werden alle betroffenen Stellen von der geplanten Änderung informiert und bewerten die Auswirkungen. Häufig ist es notwendig, als Folge der Bewertung Planungsschritte wie Produktionsplanung oder Ressourcenänderungen und davon abhängige Simulationen zu wiederholen. Derartige Wiederholungen werden über einen durchgängigen Planungsprozess auf Grundlage digitaler Daten sehr gut unterstützt, da Modellanpassungen relativ leicht vorzunehmen sind.



Abb. 7.47 Ursachen für Produktänderungen (nach Bracht et al. 2008a, S. 21)

Auf Basis der Bewertung wird entschieden, ob die Änderung durchgeführt und somit alle relevanten Daten an den neuen Entscheidungsstand angepasst werden sollen.

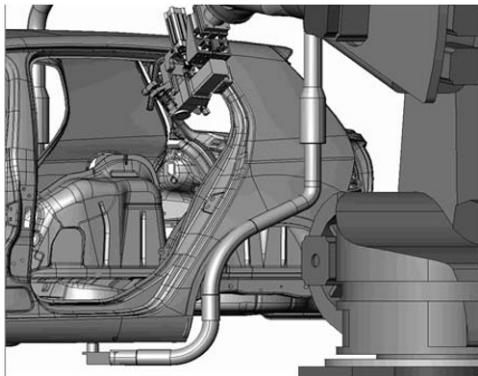
Bei einem komplexen Produkt mit einer großen Anzahl an Produktkomponenten, entsprechend vielen Fertigungsschritten, einer hohen Anzahl benötigter Produktionsressourcen, vielen beteiligten Entwicklern, Planern, Zulieferern sowie Lieferanten von Produktionsmitteln, bewirkt auch ein geringer Prozentsatz an Änderungen in einem einzelnen Bereich ein hohes Änderungsaufkommen im Gesamtprojekt. Dies belastet die Projektbeteiligten immer wieder mit der Aktualisierung des Freigabestandes und der Bewertung von Änderungen. Zur Erleichterung sind daher ein durchgängiges Management der Datenbestände und ein IT-basiertes Änderungsmanagement zweckmäßig.

Bei der IT-gestützten Prozessabwicklung ist allerdings darauf zu achten, dass der kreative Freiraum der Entwickler und Planer nicht eingeschränkt wird. Vielmehr ist durch die Entlastung von Routinetätigkeiten der Freiraum für kreative und wertschöpfende Aufgaben zu erweitern und zu erhalten.

7.4.8 Einsatz von Projekt- und Wissensmanagement

Mit der konsequenten Anwendung der Methoden und Werkzeuge der DF im Planungsprozess ergibt sich jederzeit eine transparente Sicht auf den Planungsstand eines Projektes. Anhand von Checklisten lässt sich zusätz-

lich die Qualität einzelner Planungsschritte überprüfen (Abb. 7.48). Dies gewährleistet die Vollständigkeit der Planungsleistung und stellt eine Vergleichbarkeit ähnlicher Lösungen sicher.



- Steht der Roboter richtig ? ✓
- Passt das Werkzeug zum Produkt ? ✓
- Passt das Gehänge ? ✓
- Stimmt die Schutzone ? ✓
- Offline Programmierung ✓
- Stimmt die Taktzeit ? ✓
- Stimmt die Ausbringung ? ✓

Abb. 7.48 Auszug einer Reifegradprüfung eines Planungsprozesses mithilfe der DF-Werkzeuge (Geckler und Rehnelt 2004, S. 27)

Derartige Prüfungen sind an den Prozessmeilensteinen sinnvoll, nach denen die Daten für eine weitere Bearbeitungs- oder Detaillierungsstufe genutzt werden. Diese Meilensteine sind oft mit Freigabeprozessen verknüpft. Geprüft wird etwa, ob zu jedem Produktbauteil, das im Haus gefertigt wird, ein Prozessplan existiert. Die Prüfung der Datenqualität ist meist nicht vollständig automatisierbar, sondern verlangt die Bewertung durch einen Fachmann. Einzelaspekte wie die Einhaltung von Datenformaten oder Grenzwerten (z. B. maximale Fertigungszeit, maximale Investitionsvorgabe) können aber gut von Computerprogrammen geprüft werden.

Aus der Summe der Teilprüfungen lässt sich ein Gesamtprojektstand ermitteln (Abb. 7.49), der der Projektleitung die Möglichkeit bietet, mit steuernden Maßnahmen zielgerichtet in den Projektlauf einzugreifen. Der Soll-Wert von 100% ergibt sich erst nach der Konzeptphase, wenn beispielsweise die Anzahl der zu produzierenden Teile oder der genutzten Hallenbereiche feststeht. Die Methode verschafft aber in der Detaillierungs- und Realisierungsphase einen guten Überblick über den Projektfortschritt.

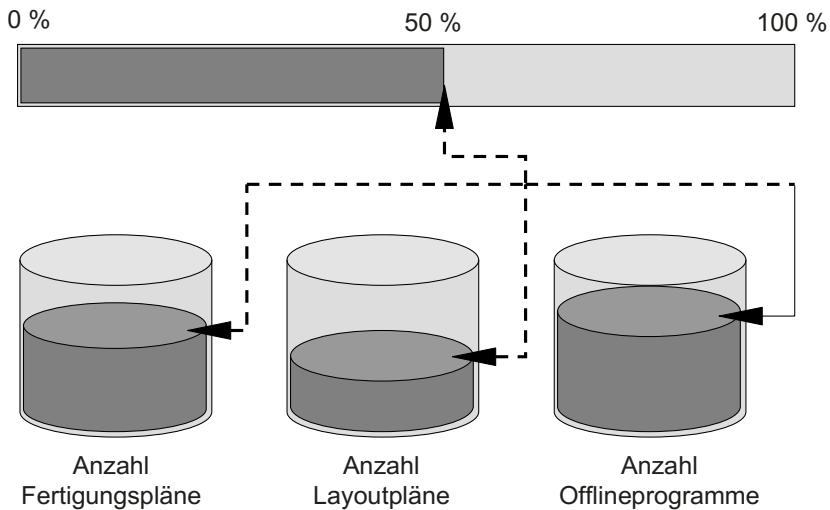


Abb. 7.49 Projektfortschrittsmessung anhand der Vollständigkeit der Datenbestände in der Digitalen Fabrik

Verbindet man diese Daten mit den Ergebnissen übergreifender Simulationen und Auswertungen, wie den Status des Fabrik-DMU, der simulierten Ausbringung und Durchlaufzeit der geplanten Produktionsanlage oder der ermittelten Energie- oder Umweltbilanz der aktuellen Planung, so ergibt sich ein transparenter Planungsstand des Gesamtprojektes.

Betrachtet man neben dem Stand von Einzelprojekten das gesamte Wissensmanagement einer Planungsabteilung, so leisten auch hier die vorliegenden Daten einen wesentlichen Beitrag. Eine entscheidende Komponente dieses Wissens findet sich in den Elementen der Bibliotheken der DF. Werden die Stammmodelle, die in den einzelnen Projekten genutzt werden, nach jeder abschließenden Projektbewertung angepasst, so nimmt die Qualität dieser Bibliotheken mit jedem neu abgeschlossenen Projekt aufgrund der gesammelten Erfahrungen zu (Abb. 7.50).

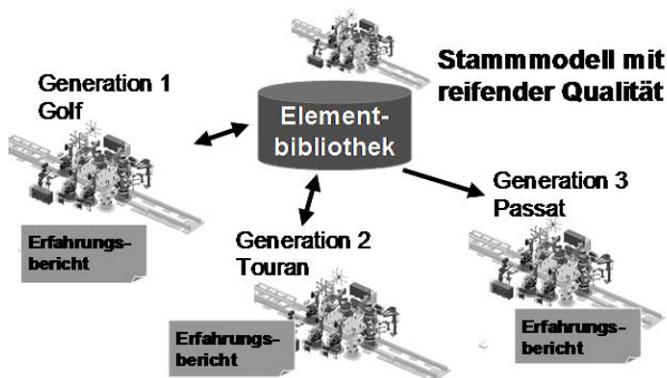


Abb. 7.50 Unterstützung eines möglichen Wissensmanagements auf Basis von Bibliotheken (Macke und Geckler 2004)

7.4.9 Planung einer energieeffizienten Produktion

Der sparsame Umgang mit Energie wird in der Automobilindustrie zu einem wichtigen Thema. So werden zurzeit von allen deutschen Automobilherstellern ehrgeizige Programme durchgeführt, um den Energiebedarf sowohl der Fahrzeuge als auch der Produktion zu senken [Autogramm, Pankow]. Die Ziele dieser Programme sind zum einen wirtschaftlich begründet. So führen Energieeffizienzmaßnahmen zu einer direkten monetären Einsparung der Betriebskosten. Zum anderen werden durch die Gesetzgebung, wie zum Beispiel der Regelung des Energiemanagements (DIN EN ISO 50001) Steueranreize gesetzt, um den Energiebedarf der Produktion zu senken. Darüber hinaus sind die Automobilhersteller stark bemüht, sich einen guten Ruf als umweltbewusste Unternehmen aufzubauen. Hier helfen Umweltpreise und Auszeichnungen, die durch energieeffiziente Produktionsmethoden errungen werden.

Angeregt durch diese Anstrengungen begannen in den letzten Jahren auch die Forschungseinrichtungen, sich mit dem Thema der energieeffizienten Produktion zu beschäftigen. Einen Überblick geben Müller et al. (2013) und Blesl und Kessler (2013).

Die Verteilung des Energieverbrauchs in der Automobilindustrie zeigt Abb 7.51 am Beispiel der Golf-Fertigung der Volkswagen AG.

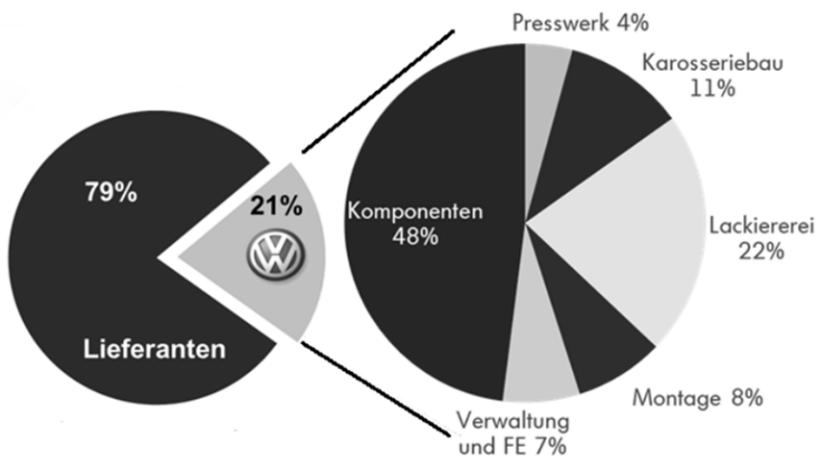


Abb. 7.51 Verteilung des Energieverbrauchs zur Herstellung eines Automobils
(Quelle: Volkswagen AG)

Der Energieverbrauch zur Herstellung der Automobile wird zum größten Teil von den Lieferanten verursacht (79 %). Darunter fallen energieaufwendige Prozesse wie die Herstellung von Stahl, Gussrohlingen, Aluminium, Kunststoffen, Farben, Reifen oder Fensterscheiben, die eine hohe Prozesswärme benötigen. Deren Erzeugung zur Fertigung der Rohmaterialien macht einen Großteil der gesamten Energie für den Prozess der Herstellung aus. Aber auch die Anfertigung kleinerer Bauteile wie Scheinwerferbirnen oder der Elektronik der Steuergeräte erfolgt nicht ohne einen erheblichen Energieaufwand.

Die verbleibenden 21% der Herstellenergie verursacht die Volkswagen AG bei der Golf-Produktion im eigenen Hause. Davon entfällt fast die Hälfte (48 %) auf die Komponentenfertigung, in welcher wieder Prozesse wie das Gießen oder Härteln hohe Prozesswärme erfordern. Bei der Fahrzeuganfertigung ist es die Lackiererei, die durch die Wärme der Trockner und den hohen Aufwand bei der Lüftung und beim Auftrag des Decklakses, den größten Energieverbrauch hat. Im Presswerk (4 %) arbeiten zwar die großen Pressen, welche aber nur mechanische Energie aufbringen müssen und daher nur einen geringen Beitrag ausmachen. Lediglich im Bereich der Warmumformung ist wieder mehr Prozessenergie erforderlich. Die Montage (8 %) verbraucht Energie im Wesentlichen für die Heizung und Lüftung der Hallen. Der Energieverbrauch der Förderbänder, Schrauber oder anderer Fertigungseinrichtungen kann dagegen nahezu vernachlässigt werden. Die unterstützenden Prozesse, Verwaltung oder Forschung und Entwicklung benötigen wiederum Energie, um die Gebäude mit Heizung, Lüftung, Licht und Strom zu versorgen. Etwas Prozessenergie ver-

wendet die Entwicklung für den Bau von Prototypen und den Betrieb von Versuchsanlagen.

Wird der Verbrauch gewerkeübergreifend zusammengefasst, so lässt sich erkennen, dass etwa die Hälfte der Energie in einer Automobilfabrik für Heizung und Lüftung verbraucht wird. Die nächst großen Verbraucher sind die thermischen Prozesse, die im Wesentlichen in den Komponentenwerken vorkommen, der Rest verteilt sich auf Prozesse wie die Kinematik der Roboter, den Transport und die Fördertechnik sowie die spanende Bearbeitung bei der Herstellung der Aggregate. Verbraucher wie die Beleuchtung oder Druckluft spielen in der Gesamtbetrachtung nur eine untergeordnete Rolle.

Die großen Effizienzprogramme der Automobilhersteller in den letzten Jahren wurden mit nur geringer Unterstützung durch die Werkzeuge und Methoden der DF durchgeführt. Die ersten Maßnahmen gelangen durch Einzelmaßnahmen, die durch Best Practice Methoden unterstützt wurden. Dazu gehörten zum Beispiel Abschaltkonzepte der Verbraucher in produktionsfreien Zeiten, die Nutzung von Komponenten mit höherem Wirkungsgrad, wie Stromsparlampen, Diodenlaser, geregelte Elektromotoren oder bessere Brenner in den Trocknern der Lackieranlagen. Aber auch schon die Abdichtung von Leckagen in den Druckluftleitungen oder der Austausch defekter Fensterscheiben bringen nennenswerte Effekte.

Mit zunehmender Effizienzsteigerung wird jede weitere Verbesserung immer komplexer. Hier können Werkzeuge und Methoden der DF genutzt werden, um Verbesserungssprünge effizient zu planen. Hierzu werden im Folgenden vier Beispiele vorgestellt.

Energiebilanzierung

In den Modellen der DF werden die Ressourcen der Fertigungsanlage in einer Baumstruktur abgebildet. Wird nun zu jedem Element dieser Struktur, welches Energie verbraucht die Energieart erfasst (zum Beispiel Strom 600V, 480V, Druckluft 12 bar oder Warmwasser 60°C etc.) sowie die Menge der pro Takt benötigten Energie, so lässt sich aufsummieren, welche Gesamtenergie zur Herstellung eines Bauteils oder eines gesamten Fahrzeuges benötigt wird.

Auf diese Art lässt sich eine Energiebilanz nicht nur zum Zeitpunkt der laufenden Produktion, sondern auch schon während des Planungsprozesses erstellen. Diese Bilanz kann die Genauigkeit der einzelnen Energiewerte berücksichtigen und angeben, ob der Wert geschätzt oder berechnet ist, auf dem Angebotswert eines Lieferanten beruht oder schon an der installierten Anlage gemessen wurde. Damit wird eine zunehmende Schärfung der Prognose über den Planungsprozess möglich.

Mit einer solchen Bilanz erlauben es einige betriebswirtschaftliche Verfahren den Energiebedarf der Fertigung gezielt weiter zu senken. Eine erste Methode, bewertet ähnliche Anlagen über ein Benchmarkverfahren. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, schon in der Konzeptplanung energieeffiziente Anlagenkonzepte auszuwählen. Dieses Vorgehen ist besonders wirkungsvoll, da in der frühen Konzeptphase die wesentlichen Weichenstellungen für den späteren Gesamtverbrauch der geplanten Automobilproduktion gestellt werden.

Im Weiteren können auf der Basis einer Energiebilanz Ziele im Planungsprozess definiert werden. Es wird beispielsweise möglich, sich das Ziel zu setzen, die Prozesse für das aktuelle Modell um einen gewissen Prozentsatz energieeffizienter zu gestalten als beim Vorgängermodell. Werden diese Ziele auf alle Fertigungsbereiche angewendet, lässt sich systematisch analysieren, in welchen Bereichen noch Potenziale zu suchen sind. Durch dieses methodische Vorgehen wird es möglich, den Energieverbrauch der Produktion flächendeckend zu reduzieren.

Eine nächste Stufe bei der Planung energieeffizienter Anlagen ergibt sich aus der ganzheitlichen Betrachtung der Nutzungs- und Investitionskosten der Produktionseinrichtungen nach dem TCO-Verfahren (TCO – Total Cost of Ownership). Dabei erfolgt die Auswahl der Beschaffung nicht nur auf Basis der Investitionskosten, sondern auch auf den damit verbundenen Betriebskosten während der Nutzungsphase. Da die Energiekosten in den Betriebskosten enthalten sind, entsteht so der Zwang bei der Beschaffung der Anlage ein wirtschaftliches Optimum aus Investitions-, Energie- und weiteren Betriebskosten zu finden.

Mit diesen Ansätzen wird deutlich, welches Potenzial in einer Bilanzierung des Energieverbrauchs auf Basis der Baumstruktur von Ressourcen in den Werkzeugen der DF liegt. Die Wirkung der Ansätze beruht auf der Analyse der gesamten aktuell geplanten Fertigungsanlage.

Die Ablaufsimulation

In vielen Gewerken der Produktion gehört eine Ablaufsimulation (siehe auch Abschnitt 4.6.3) zum Stand der Technik. Ziel dieser Simulation ist beispielsweise die Verbesserung der Ausbringung oder auch die Anordnung und Dimensionierung von Puffern, Förderstrecken oder Parallelfertigungen. Diese Simulation kann durch kleine Erweiterungen auch zur Energieberechnung genutzt werden, so dass zu jeder modellierten Anlagenkonstellation eine Energieprognose möglich wird. Damit öffnet sich die Option, den Energieverbrauch der Anlage gleichzeitig mit anderen Zielwerten wie der Ausbringung oder Investitionen zu optimieren (Abb. 7.52).

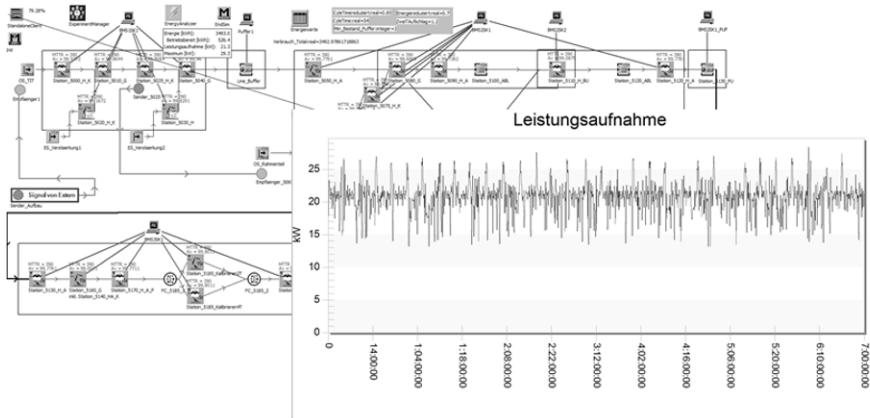


Abb. 7.52 Energieverbrauchsprognose einer Karosseriebauanlage mit der Ablaufsimulation (Geckler et al. 2017)

Eine Energieeinsparung kann bei dieser Methode besonders dadurch erreicht werden, dass die Anlage möglichst lange in einen energiesparenden Betriebsmodus läuft. Ein solcher Zustand tritt zum Beispiel auf, wenn zwischen zwei Fertigungslosen Pausen entstehen, bei Anlagenstörungen, beim Rüsten oder ähnlichen Fertigungsunterbrechungen. Am Beispiel des Karosserierohbaus zeigen Seewaldt et al. (2017) auf, dass durch den Einsatz solcher energiesparenden Betriebsmodi, als Reaktion auf Störungen und den damit verbundenen Blockaden und Wartezeiten im Gesamtsystem, bis zu 10 % Energie bei gleicher Ausbringungsmenge eingespart werden kann. Die energieeffiziente Steuerung erfolgt hierbei über den Belegungszustand der Puffer im Fertigungssystem.

Abb. 7.53 zeigt ein Beispiel aus der Zylinderkopffertigung der Volkswagen AG, wo durch geschicktes Zusammenlegen von Fertigungslosen (Abb. 7.53 rechts oben) eine längere Pause in der die Anlage in einen längeren Standby-Betrieb geschaltet werden konnte (Abb. 7.53 rechts unten). Durch dieses neue Betriebskonzept wurde der Energieverbrauch nennenswert gesenkt, ohne die Ausbringung der Anlage und die Betriebssicherheit des Fertigungsprozesses zu verschlechtern.

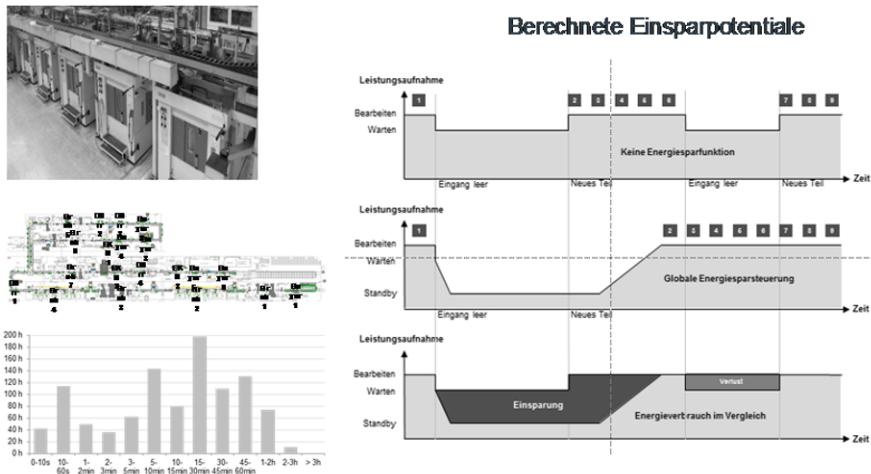


Abb. 7.53 Optimierung des Energieverbrauchs einer Anlage zur Zylinderkopffertigung (Quelle: Volkswagen AG)

Voraussetzung für eine solche Simulation ist die richtige Kalibrierung der Simulationsparameter. Hierfür sind häufig aufwendige Messungen des Energieverbrauchs der einzelnen Anlagenkomponenten erforderlich, da diese Parameter bei der bisherigen Anlagenplanung nicht berücksichtigt wurden.

Simulation der Heizung und Lüftung

Wie in der Einleitung des Kapitels beschrieben, besteht ein Großteil des Energieverbrauchs eines Automobilwerkes aus dem Verbrauch der Heizungs- und Lüftungsanlagen. Einige Beispiele sollen die besondere Anforderungen hervorheben:

In den großen Montagehallen sollen aus logistischen Gründen die Anlieferfahrzeuge möglichst dicht an die Verbrauchsorte herangebracht werden, dabei soll aber das Raumklima möglichst gleichmäßig temperiert, Abgasfrei und frei von Zugluft sein.

In den Lackierereien soll es möglich sein, die Fahrzeuge in beliebiger farblicher Reihenfolge zu fertigen. Daraus entsteht der Bedarf, die Luft in den Sprühkabinen möglichst schnell umzuwälzen, was zu einem enorm hohen Energieaufwand führt.

In den Hallen des Karosseriebaus werden immer häufiger unterschiedliche Materialien, Kleb- und Schweißverfahren miteinander kombiniert. Dies führt zu besonders emissionsstarken Schmauchbildungen, die wiederum eine energetisch aufwendige Luftumwälzung erfordern.

In Abb. 7.54 ist die Simulation einer Heizungs- und Lüftungsanlage schematisch gezeigt. Links oben ist das Simulationsmodell der Heizungs-

und Lüftungsanlage zu erkennen, welches eine gesamte Halle inklusive aller wesentlichen Energieverbraucher und Wärmequellen realitätsnah abbildet. Dieses Modell wird von einem typischen Wetterverlauf des Standortes über ein ganzes Jahr gespeist.

Die Möglichkeiten zur Auswertung einer solchen Simulation sind sehr vielfältig. In Abb. 7.54 sind rechts zwei Beispiele gezeigt. Der Temperaturverlauf in der Halle stellt u. a. dar, wann im Sommer bei welcher Dauer Maximalwerte überschritten werden. Mit dieser Auswertung kann überlegt werden, ob diese Überschreitungen toleriert werden können oder mit welchen Maßnahmen gegengesteuert werden soll. Diese Maßnahmen können als Objektveränderungen in das Simulationsmodell aufgenommen und so gleich verifiziert werden. Mit mehreren Iterationsschleifen lässt sich eine optimalen Konfiguration der Heizungsanlage ermitteln.

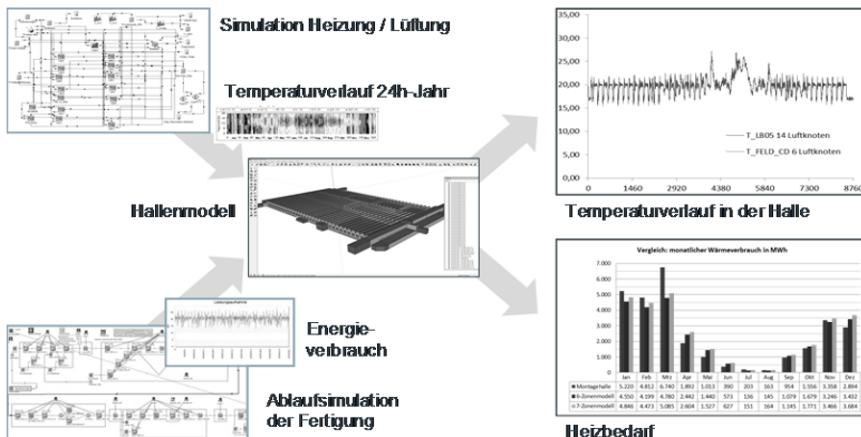


Abb. 7.54 Funktionsschema einer Heizungs-/Lüftungssimulation (Quelle: Volkswagen AG).

Der Wert der Methode liegt in ihrer Flexibilität. Mit einem Heizungs- und Lüftungsmodell ist die Wirkung einer Änderung des Wandaufbaus oder anderer Fenster auf den Heizbedarf über das gesamte Jahr darstellbar. Lage, Art und Dimensionierung von Wärmetauschern, Speichern, Wärmerädern oder Wärmepumpen lassen sich so ausprobieren: auch die Abwärme besonderer Wärmequellen auf Basis einer Ablaufsimulation kann berücksichtigt werden.

Die Nutzung der Simulation ist aber nicht nur auf die richtige Auswahl und Dimensionierung der gesamten Installation der Halle beschränkt. Unterschiedliche Betriebsszenarien, Grenztemperaturen, Schaltpunkte für Geräte und das sonstige Verhalten der Anlagen kann zusätzlich verbessert werden.

Die Energiesimulation von Robotern

Ein weiterer Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz der Fertigung sind Roboter. Wie Untersuchungen zeigen, haben die richtige Auswahl der Position, Bahn und Geschwindigkeit entlang dieser Bahn einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch eines Industrieroboters (Geckler 2015). Bei der Planung von Karosseriebauanlagen ist eine Simulation der Roboter üblich, um die kollisionsfreie Erreichbarkeit der Roboterbahnen abzusichern (siehe Kapitel 7.4.2.). Wenn diese Simulation um Energiewerte erweitert wird, kann bei jeder Roboterbewegung dessen Energieverbrauch ermittelt werden.

Wenn die möglichen Bahnen simuliert werden, kann diejenige mit dem geringsten Energieverbrauch erkennbar. Abb. 7.55 zeigt eine solche Bahn, die nach zahlreichen Simulationen und unter Zuhilfenahme einer evolutionären Optimierungsstrategie automatisch ermittelt wurde.

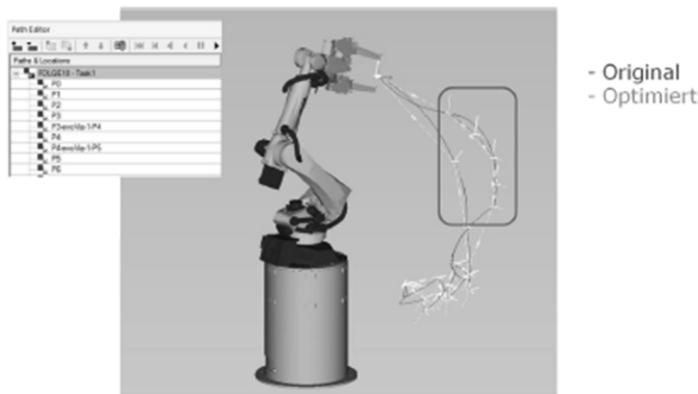


Abb. 7.55 Automatische Energieverbrauchs-Optimierung einer Roboterbahn
(Quelle: Volkswagen AG)

Die auf diesem Weg gewonnenen Bahnkurven sind energieeffizienter und dazu meist noch schneller als die ursprünglich manuell programmierten Bahnen. Nach der gleichen Methode kann auch die optimale Positionierung des Roboters in Höhe und Abstand zum Fertigungsbereich ermittelt werden.

Auf diese Weise ist der Energieverbrauch der Roboter signifikant zu reduzieren. Dabei wird der gewohnte Planungsprozess eingehalten. Lediglich die Phase der Robotersimulation wird um den Punkt der Energieverbrauchsoptimierung geringfügig erweitert.

7.5 Einsatz der Digitalen Fabrik im Anlagenbau

Die Entwicklung und Planung von Großserienprodukten ist eng mit der Konstruktion und Herstellung der dafür erforderlichen Betriebsmittel und Anlagen verbunden. Abb. 7.56 zeigt eine Schweißzelle.

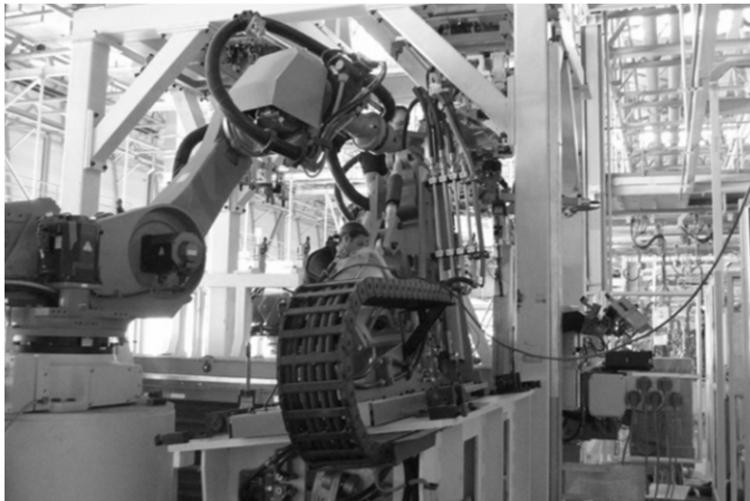


Abb. 7.56 Ausschnitt aus einer Schweißzelle im Automobilbau (Quelle: Volkswagen AG)

Im Rahmen des Simultaneous Engineering sowie des Frontloading werden bereits während der Konstruktion des Endproduktes dessen zulässige Herstellkosten und die angestrebte Qualität geplant. Diese Faktoren werden in hohem Maße durch die Qualität und die Eigenschaften der Betriebsmittel und Anlagen bestimmt. Abbildung 7.57 zeigt die inhaltliche Verbindung des Entstehungsprozesses des Endproduktes mit dem parallelen Entstehungsprozess der für die Produktion erforderlichen Betriebsmittel und Anlagen. Im Zuge des Frontloadings wird nicht nur zwischen der Produktkonstruktion und der Produktionsplanung überlappend mit frühen Daten gearbeitet, sondern auch im Zusammenspiel zwischen der Produktionsplanung, der Werkzeugkonstruktion und den häufig zahlreichen externen Anlagenlieferanten (Bracht et al. 2008b).

Der Kommunikationsbedarf und das Ausmaß der notwendigen Zusammenarbeit zwischen Prozesspartnern wachsen im Rahmen der DF sehr schnell. Mit der neuen innovativen Nutzung von Standardsoftware (vgl. Abschnitt 5.8) und insbesondere durch die Implementierung von Investiti-

onsrechnungen ist auch das Thema des Datenschutzes zu einer wesentlichen Herausforderung geworden. Anforderungen und Lösungen zur Prozessintegration zwischen OEM und Anlagenlieferant zeigt Filter (2009) in seiner Dissertation am Beispiel des Pkw-Karosseriebaus auf.



Abb. 7.57 Verknüpfung der Anlagen- und Betriebsmittelentstehung mit dem PEP

Die Methoden und Werkzeuge der DF unterstützen in diesem Prozess insbesondere zwei Aufgaben (Abb. 7.58): zum einem werden sie zur Planung und Ausgestaltung der Fertigungsprozesse eingesetzt; zum anderen dienen sie dazu, Steuerungsprogramme der Anlagen zu erstellen und in Betrieb zu nehmen. Letztere werden dann zusammen mit den Einrichtungen an die Kunden der Anlagen ausgeliefert. Die DF umfasst damit nicht nur Planungswerkzeuge, sondern auch Werkzeuge für den Betrieb der Anlagen.

Der Planungsprozess entspricht dem des zu fertigenden Großserienproduktes, wie am Beispiel der Automobilproduktion beschrieben. Dabei werden das Produkt sowie der dazugehörige Fertigungsprozess durch die Simulation einzelner Arbeitsoperationen wie des Umformprozesses, der spanenden Verarbeitung, der Lackierung oder der Füge- und Montageprozesse untersucht. Hierbei wird festgelegt, mit welchen Ressourcen das Produkt bearbeitet werden soll. Dies geschieht mit integrativen Lösungskonzepten (vgl. Abschnitt 5.8) über die simultane Planung von Produkt, Prozess und Ressourcen und wird durch spezifische Simulationsprogramme der einzelnen Fertigungstechnologien unterstützt.

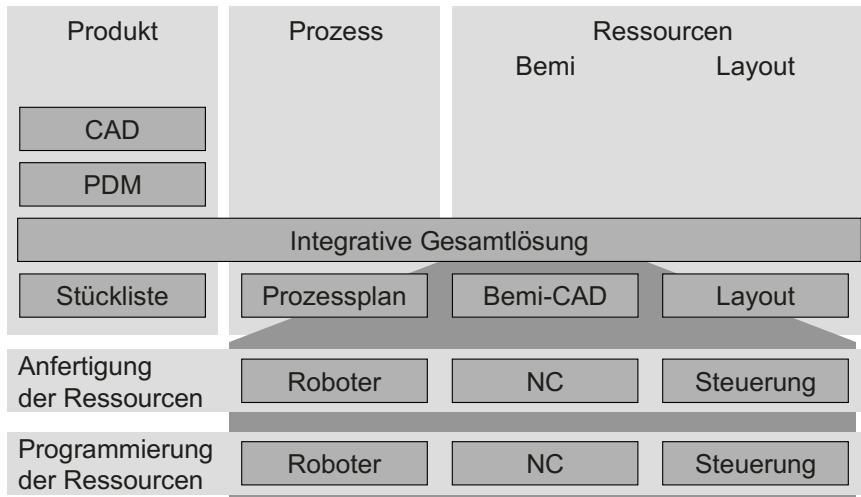


Abb. 7.58 Informationsfluss und Anbindung der DF im Anlagenbau (Legende: CAD – Computer Aided Design, PDM – Product Data Management, PPR – Produkt, Prozess, Ressource, Bemi – Betriebsmittel, NC – Numerical Control)

Ergebnisse sind der Prozessplan, ein Entwurf der Betriebsmittel als CAD-Modell sowie ein Layout der Fertigungsanlage. In der weiteren Bearbeitung erfolgt im Anlagenbau die vollständige Konstruktion des Betriebsmittels auf Basis des Entwurfs unter Berücksichtigung der Prämissen des Layouts. Diese Daten bilden dann die Grundlage für die Fertigungsplanung des Betriebsmittels.

Parallel zur physischen Anfertigung erfolgt mit Unterstützung der Werkzeuge der DF die Erstellung der logischen Komponenten der Anlage (vgl. auch Schäfer 2008). Dies können je nach Anlagenart Roboterprogramme, NC-Steuerungen oder SPS-Steuerungen sein.

Bei der virtuellen Inbetriebnahme (siehe auch Abschnitte 2.5 und 5.8.4) kann das Zusammenspiel der Anlagensteuerung im Verbund mit den NC- und Roboterprogrammen durch das digitale Anlagenmodell überprüft werden. Dabei werden dieselben Steuerungsprogramme verwendet, die später auch in der realen Anlage zum Einsatz kommen (Abb. 7.59). Dem Steuerungsprogrammierer wird auf diese Weise ermöglicht, die Steuerung vor dem Aufbau der realen Anlage vollständig zu definieren und virtuell zu überprüfen. Dabei können neben dem Normalbetrieb auch Bedien- und Störszenarien analysiert werden.

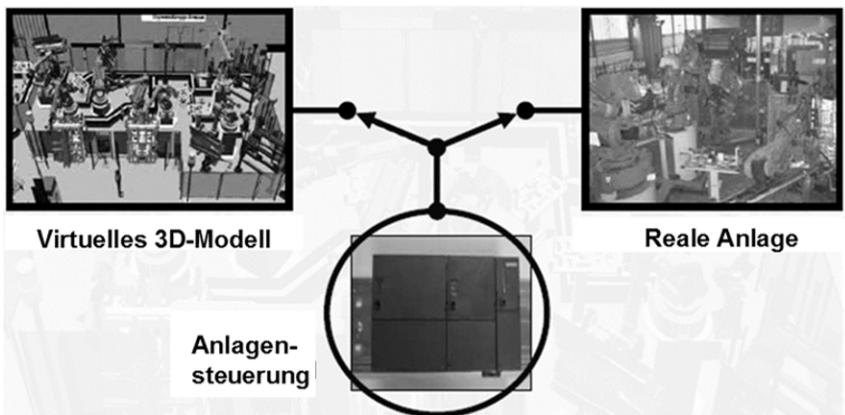


Abb. 7.59 Nutzung von digitalem Modell und realer Anlage in der virtuellen Inbetriebnahme (Schoch 2008, S. 9)

Diese Arbeitsweise ermöglicht es, bei der Inbetriebnahme nur noch Feinkorrekturen in der Anlagenkinematik und -geometrie sowie eventuelle Änderungen aufgrund von Produkt- oder Prozessoptimierungen vorzunehmen. Eine Arbeitsplatzkonfiguration zur virtuellen Inbetriebnahme zeigt Abbildung 7.60.

Ausgangspunkt für die Steuerungsdaten ist das virtuelle 3D-Modell der zu steuernden Anlage mit Funktionen der Offline-Programmierung sowie Simulationsfunktionen für die Anlagenkinematik und die Steuerungskomponenten. Ein Kommunikationsrechner übernimmt die Datenübertragung zur Anlagensteuerung. Diese kann die Steuerungsfunktionen simulieren oder an die Maschinenbedienung weiterleiten. Ein Programmierplatz für die Maschinenfunktionen sowie eine Maschinensteuerung zu Simulationszwecken vervollständigen den Arbeitsplatz.

Insgesamt muss damit „ein Fabrikbetrieb, der im Rechner abgebildet, verifiziert, und verbessert wird, die Anforderung erfüllen, den Betrieb einer Fabrik so realistisch wie möglich abzubilden, vor allem bezüglich seines Zeitverhaltens. Damit werden beispielsweise Echtzeitanforderungen gestellt, wie sie im realen Betrieb auftreten“ (Sauer 2011, S. 960).

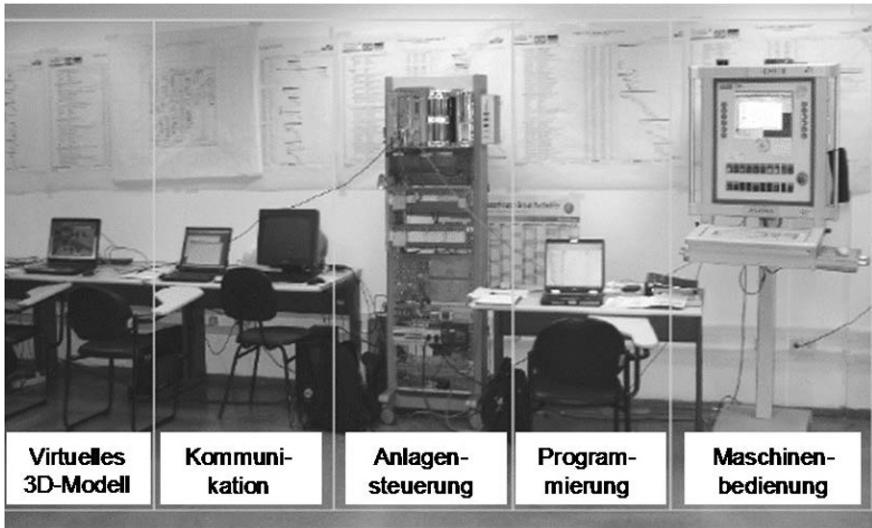


Abb. 7.60 Typischer Aufbau eines Arbeitsplatzes zur virtuellen Inbetriebnahme (Schoch 2008, S. 12)

Wenn die Modelle und Steuerungen vor Ort vorliegen, ist eine hybride Anwendung möglich. Dazu können einzelne Elemente der realen Anlage durch die simulierten Funktionen ersetzt werden. Diese Betriebsweise hat mehrere Vorteile:

- Die Steuerungssoftware muss nicht geändert werden, wenn während der Inbetriebnahme oder bei Anlagenwartungen einzelne Anlagenkomponenten abgeschaltet werden.
- Während der Inbetriebnahme können einzelne Anlagenkomponenten schon erprobt und eingearbeitet werden, während sich andere noch im Aufbau oder in der Anlieferung befinden.
- Einzelne Anlagenkomponenten, wie z. B. Kleberpumpen, deren Einsatz erst bei voller Stückzahl sinnvoll ist, da sonst der Kleber eintrocknet, können während der Inbetriebnahme oder bei Umbauarbeiten gezielt abgeschaltet werden.

Der Einsatz von digitalen Modellen während der Inbetriebnahme der Anlagen bietet somit insgesamt Nutzenpotenziale, die über die Vorteile während der Planungsphase einer Anlage hinausgehen.

Nach Aussage des Produktionsvorstands von Audi, Dr. Hubert Waltl, konnte im Herbst 2016 zum ersten Mal ein Werk, und zwar die neue Fabrik in Mexiko in der Provinz Puebla, komplett virtuell geplant und virtuell

optimiert in Betrieb genommen werden. Allein die Zeiteinsparung betrug 30 Prozent (Köth und Günnel 2016).

7.6 Ganzheitliche Planung neuer Fertigungstechnologien

Um innovative Fertigungstechnologien schneller und sicherer zu entwickeln und zur Produktionsreife zu bringen, bedarf es neuer Methoden und Instrumente. Hier bieten die Werkzeuge der DF herausragende Möglichkeiten zur frühzeitigen, umfassenden Planung neuer Fertigungstechnologien (vgl. auch Huber 2016).

In diesem Abschnitt sollen am Beispiel der neuen Rohbau-Fertigungstechnologie des Profilierens von Strukturauteilen einer Karosserie die Konfiguration, die Modellierung und die virtuelle Optimierung von Walzprofilieranlagen vorgestellt werden. Sie werden dem aktuellen Produktionsprozess Tiefziehen gegenübergestellt und zeigen in bestimmten Bereichen wirtschaftlichere Lösungen auf. Im Fokus steht die Sensibilisierung des *Denkens in Prozessketten*.

Diese Technologie und die geplanten Anlagenkonfigurationen werden nicht zuletzt aufgrund der deshalb auch hier ausführlich beschriebenen Vorgehensweise bereits in die Serienplanung übernommen.

7.6.1 Einführung

Im Rohbau der Automobilwerke wird derzeit zur Herstellung von Strukturauteilen für die Fahrzeugkarosserie weitestgehend auf das Fertigungsverfahren Tiefziehen zurückgegriffen. Einen grundsätzlichen Vergleich der Vor- und Nachteile der Verfahren Tiefziehen und Walzprofilieren zeigt Abbildung 7.61. Das Tiefziehverfahren erlaubt eine wirtschaftliche Herstellung anspruchsvoll geformter Bauteile. Hohe Ausbringungsraten durch automatisierte Transfereinrichtungen in Kombination mit Doppelteilfertigung haben die Durchlaufzeiten im Presswerk sinken lassen. Verbesserte vollautomatische Rüstsysteme erlauben kleine Losgrößen und geringe Werkzeugwechselzeiten. Trotz hoher Investitionsmittel können dadurch die Fertigungskosten gering gehalten werden.

Infolge zunehmender Produktionsüberkapazitäten und damit geringer werdender Anlagenauslastung wirken sich jedoch die großen Investitionsvolumina zur Anschaffung geeigneter Pressen negativ auf die Fertigungskosten aus. Besonders nachteilig bei kleiner werdenden Stückzahlen sind hohe Werkzeugkosten. Für jede geometrische Bauteilvariante (Länge, Breite, Wandstärke) muss in der Regel ein eigener Werkzeugsatz beschafft

werden. Für eine kostengünstige Herstellung kleiner Stückzahlen und verschiedener Bauteilvarianten sind daher die Werkzeuge wenig flexibel. Nur in Ausnahmefällen ist mit hohen Kosten eine Fertigung von Bauteilvarianten (unterschiedliche Länge oder Geometrie) mit demselben Werkzeugsatz anhand modular aufgebauter Werkzeugsätze möglich. Hohe Investitionen bei Presswerkzeugen verbunden mit geringen Fertigungsstückzahlen bewirken daher hohe Werkzeugumlagen pro Bauteil (Bracht et al. 2007a).

Beurteilungskriterien der Fertigungsverfahren	Tiefziehen	Walzprofilieren
Formgebungsmöglichkeit	+	-
Ausbringungsrate	+	+
Rüstzeit	+	-
Investitionsbedarf Anlage/Werkzeuge	-	+
Materialausnutzung	0	+

Anmerkung zur Wertung: „+“ = gut; „-“ = schlecht; „0“ = neutral

Abb. 7.61 Gegenüberstellung der Umformverfahren Tiefziehen und Walzprofilieren für Strukturauteile

Das Kriterium Materialausnutzung muss beim Tiefzieh- und Walzprofilierverfahren anhand derselben Bauteilgeometrie verglichen werden. Hier kommt es speziell auf den betrachteten Einzelfall an. Größtenteils werden große Materialabfälle durch die von der Bauteilform abgeschnittenen Ziehflansche (Differenz zwischen Ziehteil und Fertigteil) verursacht. Obwohl dieser Verschnitt als Schrott vom Stahlwerk vergütet wird, belastet er die Materialstückkosten.

Im Regelfall kann ein profiliertgerecht konstruiertes Bauteil als Press-teilausführung ohne den Fertigungsschritt Tiefziehen nur mittels Abkanten und Hochstellen hergestellt werden. Überstehende Flansche, die beim Tiefziehvorgang für hohen Materialverschnitt verantwortlich sind, sind bei diesen Prozessschritten nicht erforderlich. Der Verschnitt liegt hier in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Profilieren desselben Bauteils. Bei den hier betrachteten, profilierbaren Strukturauteilen kann jedoch nicht immer auf den Ziehflansch verzichtet werden. Daher ist beim Vergleich

der Herstellungsverfahren die Materialausnutzung beim Walzprofilieren geringfügig besser.

Hoch- und höherfeste Bleche besitzen ein schlechtes Umformverhalten. Der verstärkte Einsatz höherfester Werkstoffe mit bis zu 1200 MPa Zugfestigkeit macht beim Tiefziehen daher eine Anpassung der Bauteilkonstruktion, der Methodenplanung, der Werkzeugherstellung und der Fügetechnik erforderlich. Die heute geforderte Bauteilgenauigkeit kann nur mit besonderen Maßnahmen bei der Werkzeuganfertigung eingehalten werden. Der erhebliche Mehraufwand macht sich in höheren Werkzeugkosten und längeren Werkzeuganfertigungszeiten bemerkbar.

Beim Umformverfahren Walzprofilieren wird ein Metallband durch hintereinander angeordnete Walzenpaare zu einem Profilstrang umgeformt (Abb. 7.62). Durch Abstimmung der aufeinander folgenden Walzenrollenpaare kann nahezu jeder beliebige Profilquerschnitt erzeugt werden. Die Spaltgeometrie zwischen Ober- und Unterwalze verändert sich entsprechend der gewünschten Querschnittsform des Bandes bis zum Profilstrang. Wie bei allen Biegeverfahren bleibt die Banddicke dabei nahezu unverändert. Der kontinuierliche Materialfluss durch die Profilieranlage erlaubt die Verarbeitung von Bändern bis zu etwa 2 m Breite und einer Blechdicke von 0,2 bis 20 mm bei Durchlaufgeschwindigkeiten bis über 100 m/min. Abhängig von den Ausbringungsraten der zusätzlich in die Profilierprozesskette integrierten Stationen lassen sich Vorschübe bis zu 40 m/min realisieren.

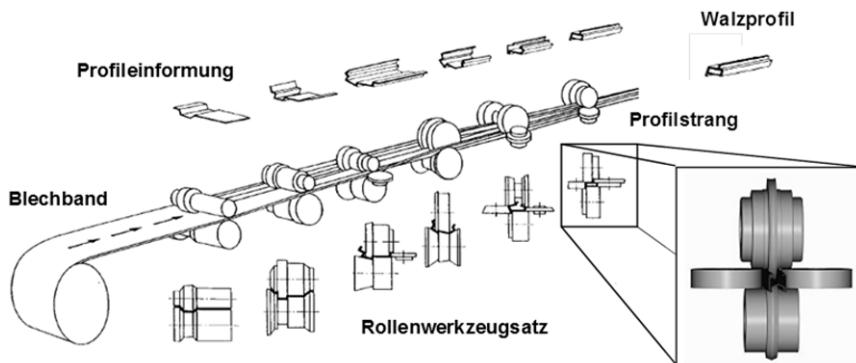


Abb. 7.62 Schematische Darstellung des Walzprofilierens

Weiterhin lassen sich mit diesem Prozess auch beschichtete und vorlackierte Bleche verarbeiten. Zusätzliche Funktionselemente wie Nieten, Bolzen und Stanzmuttern können im Fertigungsablauf an den Profilstrang

angebracht werden. Zudem können Werkstücke mit bestimmten Krümmungsradien über die Längsachse hergestellt werden. Am Ende des Profiliervorgangs kann der Profilstrang auf unterschiedliche Profilsegmente abgelängt werden. Nahezu kostenneutral können so im laufenden Produktionsbetrieb Bauteilvarianten unterschiedlicher Länge entstehen.

Das Walzprofilierverfahren zeichnet sich durch vergleichsweise geringe Investitionen für Produktionsanlage und Werkzeugsatz aus, mit der Folge niedriger Fertigungsstückkosten und Werkzeugumlagen. Ebenso erlaubt der Profilierprozess aufgrund des breitengenauen Einlaufs des Blechbandes in den Umformprozess eine hohe Materialausnutzung. Verschnitte nur bis zu ca. 10 % reduzieren die Materialkosten pro Bauteil.

Bei der Verarbeitung hoch- und höchstfester Metallbänder zu Profilen kann das Profilierverfahren die Qualitäts- und Toleranzanforderungen an das Werkstück gut erfüllen. Die Maßhaltigkeit der Bauteile kann durch eine Kalibrierseinheit am Ende des Profilierprozesses sichergestellt werden. Vorteilhaft erweist sich beim Profilieren die Möglichkeit der kontinuierlichen Blechverarbeitung über hintereinander eingreifende Walzenrollenpaare mit hoher Produktionsgeschwindigkeit. Nachteilig ist jedoch, dass Verformungen im kontinuierlichen Prozess fast ausschließlich in Bauteillängsrichtung erfolgen können. Im Gegensatz zum Tiefziehen sind dadurch nur weniger anspruchsvoll geformte Bauteile herstellbar. Für die Erweiterung der Anwendbarkeit des Walzprofilierens müssen daher die Möglichkeiten zur Profilformgebung in der Walzprofilierlinie verbessert werden. Weiterhin sind die Rüstzeiten auf die Losgrößen im Karosseriebau abzustimmen.

Um die Variantenvielfalt bei der Bauteilherstellung kostenneutral sicherzustellen, ist die Herstellung geometriähnlicher Werkstücke mit einem Werkzeugsatz notwendig. Durch die aktuellen Herstellungs- und Bearbeitungsmöglichkeiten eines Bauteils auf einer Profilieranlage ist das Anwendungsspektrum zu profilierender Teile vornehmlich auf gerade Strukturbauenteile der Fahrzeugkarosserie beschränkt. Profilbauteile können zudem auch ebene Krümmungen, Löcher, Ausstanzungen und Einprägungen aufweisen. Vorwiegend profilierbare Bauteile in der Karosserie sind damit Seitenaufprallschutz, Biege-, Längs- und Querträger sowie Dachrahmen und Verstärkungselemente (Abb. 7.63).

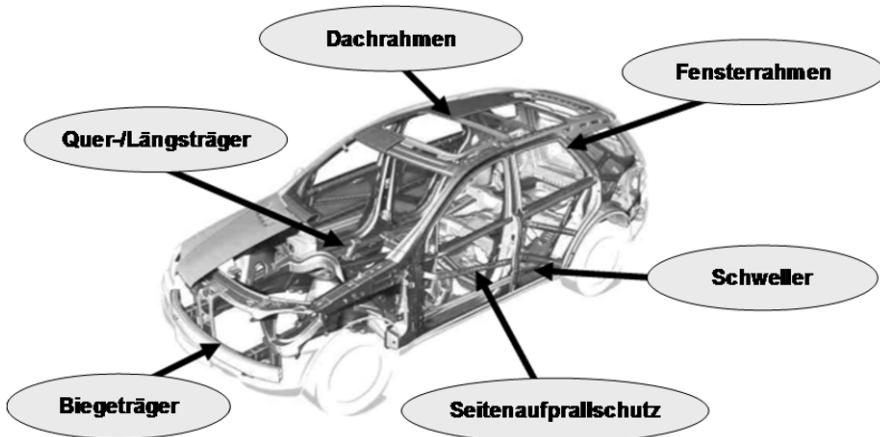


Abb. 7.63 Walzprofiilierte Bauteile in einer Rohbaukarosserie

Neben der teilweisen Substitution tiefgezogener Bauteile durch Profile wird in Studien auch eine gänzliche Umgestaltung der Karosserie weg von der Schalenbauweise hin zur Rahmenbauweise mit Profilen verfolgt. Nach einer Untersuchung (Osburg et al. 2004) lassen sich dann mittels geeigneter Kombination von innovativer Profilbauweise und konventioneller Schalenbauweise etwa 20 % des Gewichtes einer Rohkarosserie als Walzprofilbauteile ausführen.

7.6.2 Planung und Bewertung neuer Prozessketten beim Walzprofilieren

Die Ausweitung des Einsatzspektrums walzprofilerter Bauteilkomponenten ist nur gegeben, wenn die Möglichkeiten der Formgebung innerhalb der Prozesskette verbessert und die Rüstzeiten beim Werkzeugwechsel reduziert werden. Dazu ist eine hinreichende Flexibilität im Anlagenaufbau und bei der Werkzeugnutzung notwendig. Aufgrund der in Reihe geschalteten Bearbeitungsstationen lässt der Anlagenaufbau von Walzprofilierlinien zusätzliche Erweiterungen seiner Konfiguration zu.

Um die Möglichkeiten der Formgebung am Blech- bzw. Profilbauteil zu erhöhen, sind vor und hinter der Profiliereinheit zusätzliche Blech- und Profilbearbeitungsstationen anzuordnen. Die große Flexibilität im Aufbau von Profilierlinien erweist sich gerade bei zukünftig herzustellenden Profilformen als wesentlicher Vorteil. Abgestimmt auf neu zu fertigende Bau teilgeometrien können an nahezu beliebiger Stelle Stationen ins Anlagen layout eingefügt, ausgebaut oder ausgetauscht werden. Dabei kann

einerseits auf schon altbewährte, bisher separat betriebene Werkzeugmaschinen wie z. B. Biegemaschinen, Stanz- und Prägeeinheiten zurückgegriffen, andererseits aber auch schon an neue, noch in der Entwicklungsphase stehende Bearbeitungstechnologien gedacht werden. Aufgewertet werden kann der konventionelle Walzprofiliervorgang beispielsweise durch die Integration von:

- Nachformeinheiten,
- Fügestationen,
- Montagestationen und
- nichtlinearen Biegemaschinen.

Erste flexibel aufgebaute Profilieranlagen sind bereits bei der Herstellung von Profilbauteilen im praktischen Einsatz: zwei ineinander laufende Blechbänder unterschiedlicher Materialgüte werden dabei zu einem Profil eingeformt (Integralbauweise) (Dreistern Maschinenbau GmbH & Co KG 2004). Auch kann der Profiliervorgang bei der Herstellung spezieller Bauteilformen sowohl mit dem Warmumformen als auch mit einem Tiefziehprozess gekoppelt werden. Um hohe Rüstzeiten und zugleich Werkzeugumlagen zu reduzieren, ist die Flexibilität der Werkzeuge weiter zu erhöhen. Dazu gehört einerseits die Automatisierung des Rollenwechsels durch Schnellwechselgerüste. Andererseits wird versucht, die verwendeten Werkzeuge so flexibel zu gestalten, dass sie einfach an verschiedene Bauteilgeometrien anpasst werden können. Zur Anwendung kommen hierbei z. B. flexibel aufgebaute Profilierwerkzeuge (Schmoeckel und Istrate 2003) oder breitenverstellbare Profiliergerüste können.

Mit dem Walzprofilierverfahren ist es möglich, mit einem einzigen Rollenwerkzeugsatz verschiedenartige Strukturbauenteile mit über der Längsachse veränderlichen Querschnitten herzustellen. Das Verfahren hilft, das Formenspektrum profilierten Bauteile im Karosseriebau auszuweiten. Durch die Nutzung desselben Rollenwerkzeugs für verschiedene, geometrisch ähnliche Bauteile verringern sich die auf die Bauteile umzulegenden Werkzeugkosten.

Durch einen flexiblen Aufbau des Anlagenkonzepts und der Werkzeugsätze in der Profilierprozesskette haben sich im Rahmen einer umfassenden Untersuchung (Enge 2007) bei der Anlagenkonfiguration u. a. folgende Hauptgestaltungspunkte herausgestellt. Die Prozesskette kann aufgebaut werden durch:

- Vor- und/ oder Nachbearbeitungsstationen
- Mitfahrende oder stationär eingreifende Bearbeitungsstationen
- Bearbeitungsstationen am Profilstrang oder am bereits abgelängten Profilsegment (inline oder offline)

- Bearbeitungsstationen innerhalb oder außerhalb des Profilierprozesses (inline oder outline)
- Kontinuierlich durchlaufender oder intermittierend taktender Blechvorschub im Anlagenbetrieb

Die Positionierung und Reihenfolge der Bearbeitungsstationen in der Profilierprozesskette ist eine entscheidende Größe für die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette und die Wettbewerbsfähigkeit des Verfahrens gegenüber konkurrierenden Umformtechniken. Jede in den Prozess integrierte Station benötigt zusätzliche Investitionen. Inwieweit sich durch gleichzeitige Erhöhung der Formgebung und Verringerung der Produktions- und Rüstzeit Vorteile ergeben, muss durch eine Gegenüberstellung der anfallenden Investitionen bewertet werden. Dies macht die Gesamtbetrachtung sowohl der Produktivität als auch der Flexibilität des Prozesses erforderlich. Bezuglich der beschriebenen Eigenschaften von Walzprofilieranlagen sind bei der Konfiguration von Profilierprozessketten u. a. folgende Fragen zu lösen:

Wie ist die technologische Verfahrensfolge einer Prozesskette für die Herstellung eines Profilbauteils?

- Welche Konfiguration muss die Prozesskette aufweisen, um ein Profil mit minimalen Stückkosten herzustellen?
- Welche Eigenschaften muss die Prozesskette besitzen, damit das Profilerverfahren gegenüber dem Tiefziehprozess produktiver, rentabler und flexibler ist?
- Welche Aufbauflexibilität ist mit minimalen Investitionsmitteln erreichbar?
- Welche Investitionen werden für maximale Flexibilität benötigt?

Zur Beantwortung dieser Fragen dient der im folgenden Abschnitt erläuterte ganzheitliche Ansatz.

7.6.3 Ansatz und Vorgehensweise

Um frühzeitig Aussagen über das kostengünstigere Fertigungsverfahren (Tiefziehen oder Walzprofilieren) und eine entsprechende wirtschaftliche Anlagenkonfiguration zu treffen, bedarf es einer geeigneten Bewertungsmethodik (Enge 2007).

Im Rahmen der DF wird daher versucht, ein vollständiges digitales Abbild der realen Prozesskette Walzprofilieren zu entwickeln. Dieses umfasst die Konfiguration, die Modellierung, die Materialflusssimulation, die Visualisierung und die monetäre Bewertung von Profilierprozessketten. Parallel zur technologischen Herstellbarkeit werden so relevante Bewer-

tungskriterien des gesamten Profilierprozesses (z. B. Bauteilkosten, Flexibilität der Anlage und der Werkzeuge) sowie die gesamte Prozesskette (inline, offline, outline) bis hin zur Komponentenfertigung untersucht. Ziel ist es, die Entwicklung von Fertigungstechnologien wie auch die Bewertung von Produktionsanlagen effizienter zu gestalten. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde gemeinsam vom DaimlerChrysler Forschungszentrum und dem Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal (IMAB) eine Walzprofilieranlage als VR-Modell modelliert und visualisiert (Abb. 7.64).

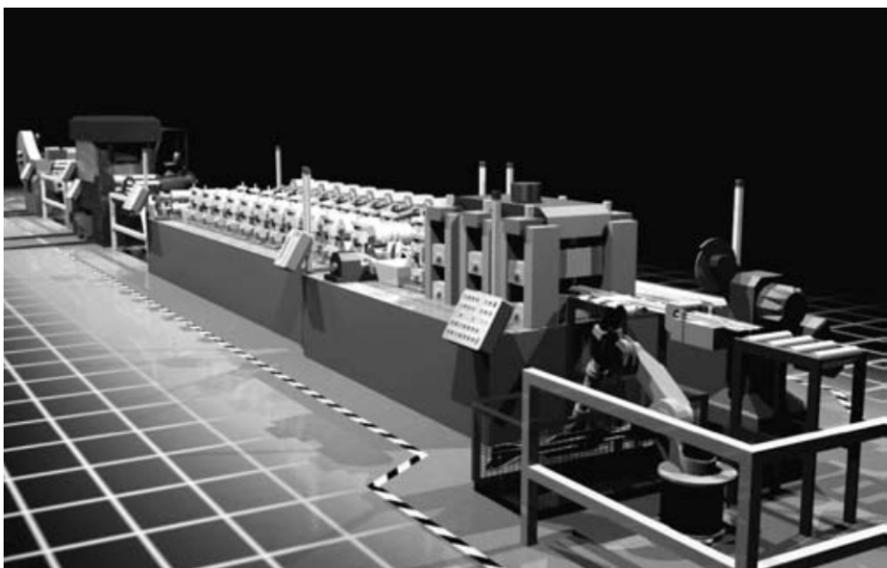


Abb. 7.64 Abbildung einer Walzprofilieranlage als VR-Modell

Die virtuelle Abbildung unterstützt nicht nur Konstrukteure, Anlagen- und Produktionsplaner bei ihrer Arbeit, sondern kann auch sehr effektiv als Instrument bei der Überzeugung von Führungskräften, Entscheidungsträgern und Kunden für die Akzeptanz von neuen Produktionsprozessen eingesetzt werden.

Zur Beantwortung der mit dem Profilierverfahren verbundenen Produktionsmerkmale wurde ein modularer Ansatz für den Aufbau einer Gesamtmethodik gewählt (Enge 2007). Die Gestaltung jedes einzelnen Programmoduls ist problemspezifisch auf einen bestimmten Fragenkomplex zum Thema Profilieren ausgerichtet worden. Innerhalb der Gesamtmethodik ist jedes Modul unabhängig von den anderen Stufen für die Planung

von Prozessketten und die Bewertung von Strukturbau Teilen anwendbar (Abb. 7.65).

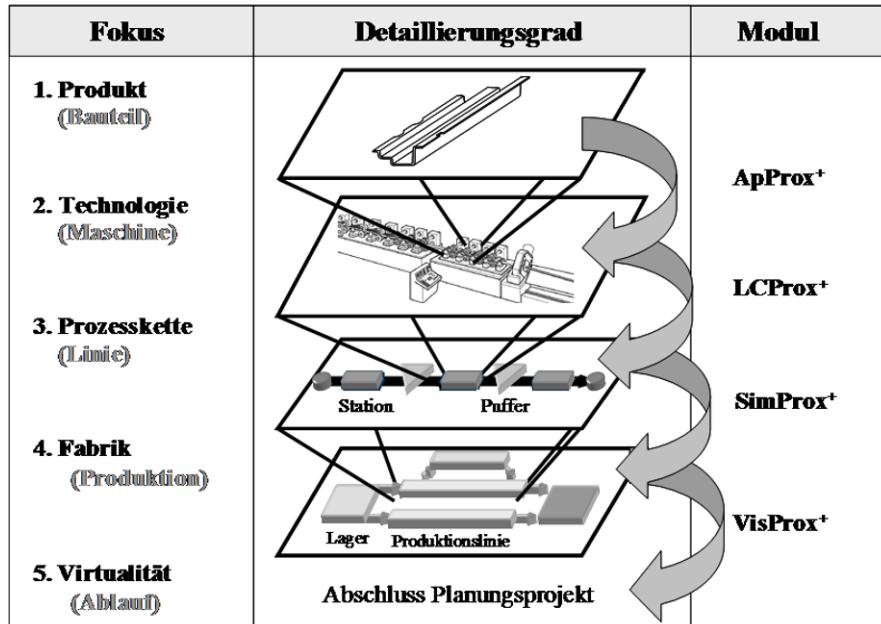


Abb. 7.65 Gesamtmethodik zur Planung neuer Prozessketten (Enge 2007, S. 21)

Um den Rechenaufwand bei gleichzeitiger Steigerung der Ergebnisqualität zu minimieren, werden nicht alle vier Module bei jeder produktionswirtschaftlichen Frage zum Thema Profilieren eingesetzt. Vielmehr wird das für die Fragestellung sinnvolle Modul ausgewählt. Je nach Anwendungsfall können daher auch einzelne Module übersprungen sowie auf unter- bzw. übergeordnete Module zurückgegriffen werden.

Unter Berücksichtigung des hierarchischen Konzeptes liefern die Module einen zunehmend höheren Detaillierungsgrad der Ergebnis- und Lösungsqualität. Aufgrund des steigenden Zeitbedarfs für die Erhebung der Eingabedaten, für die Erstellung des Prozesskettenmodells sowie für den Rechenaufwand einer Untersuchung steigt dadurch jedoch gleichzeitig der Bedienungsaufwand des einzelnen Moduls. Gleichzeitig sinkt aufgrund des einzugebenden Datenvolumens die Handhabbarkeit und Schnelligkeit in der Anwendung der Module. Da jedoch eine zu geringe Detaillierungstiefe zu groben und unvollständigen Ergebnissen führen kann, muss aufgabenspezifisch zwischen Handhabungs- und Detaillierungsgrad abgewogen werden.

Die Gesamtmethodik nach Enge gliedert sich in vier Module, mit denen Prozessketten virtuell geplant und bewertet werden können (Abb. 7.66).

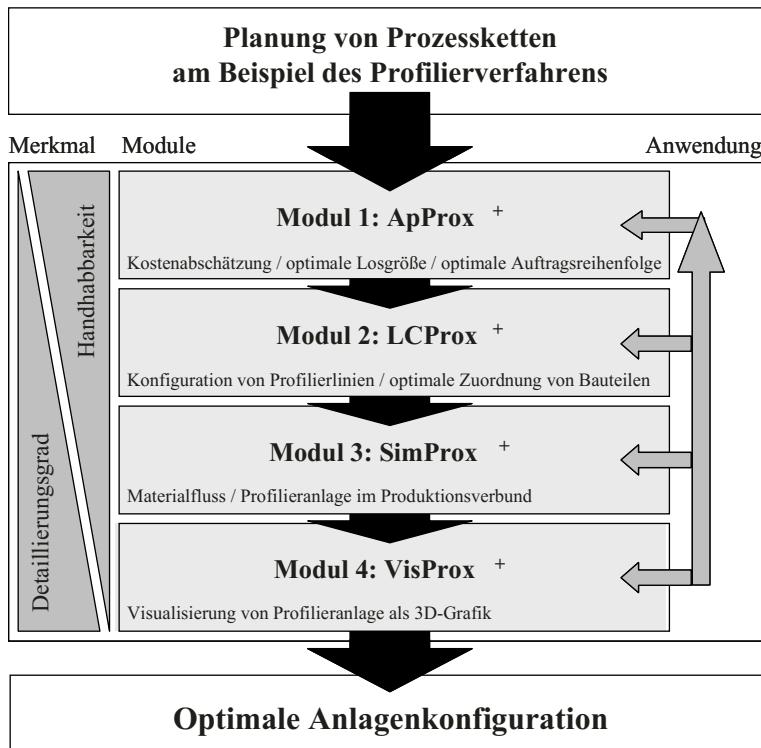


Abb. 7.66 Planung des Produktionssystems Profilieranlage

Das Modul ApProx+ unterstützt den Benutzer bei einer ersten Kostenabschätzung von Profilbauteilen und Teilefamilien sowie deren Auftragssteuerung. Mit LCProx+ können für mehrere Profilbauteile die Anzahl benötigter Profilieranlagen sowie die Stationsanordnung innerhalb der Prozesskette geplant werden. SimProx+ erlaubt durch die Verwendung von zwei Programmapplikationen (Tabellenkalkulation und Simulation) eine durchgängige Bewertung von Fertigungszeiten bei Baugruppen und eine Untersuchung von umfassenden Produktions- und Logistikkonzepten. Unter Verwendung von VR-Techniken kann mittels des vierten Moduls VisProx+ der Produktionsablauf anhand einer virtuell dargestellten 3D-Profilieranlage geplant und beurteilt werden.

Alle Module der Gesamtmethodik basieren auf dem Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel und der Programmiersprache VBA (VBA – Visu-

al Basic for Application). SimProx+ verwendet zudem die Simulationssoftware Plant Simulation. Das Modul VisProx+ verwendet zur Visualisierung des Modells das Grafikprogramm 3DStudio Max (Abb. 7.67).

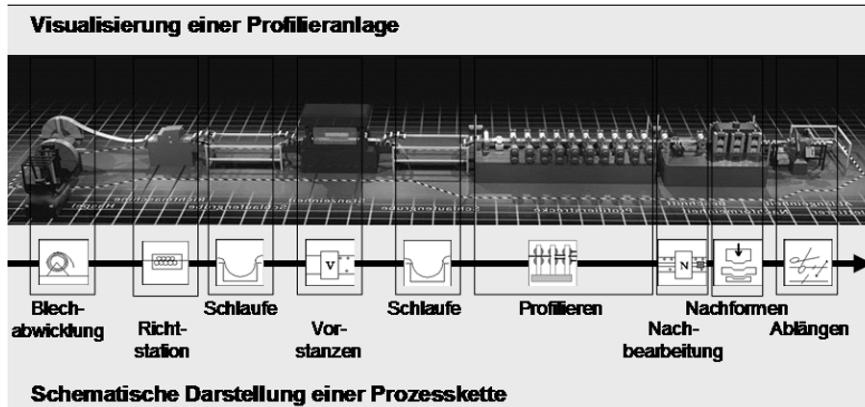


Abb. 7.67 Profilierprozesskette im Modul VisProx+ (Enge 2007, S. 142)

Unter Zuhilfenahme der Module kann die somit bereits angesprochene Flexibilität von Anlagen und Werkzeugen, die Integrationsmöglichkeit von Arbeitsstationen sowie die Wirtschaftlichkeit von Prozessketten zur Ermittlung einer kostengünstigen Profilherstellung analysiert werden (siehe Enge 2007).

7.6.4 Ergebnisse

Unter Berücksichtigung von technologischer Machbarkeit und betriebswirtschaftlicher Kostenrechnung kann mittels der Planungs- und Bewertungsmethodik beantwortet werden, wie Produkt- und Produktionskriterien beschaffen sein müssen, damit die Fertigung des als Walzprofil auszuführenden Bauteils wirtschaftlich ist. Abbildung 7.68 zeigt schematisch die Gegenüberstellung des Tiefzieh- und Walzprofilierverfahrens anhand der Stückkostenverläufe (Fertigungs- und Werkzeugstückkosten) abhängig von der zu produzierenden Jahresstückzahl. Der Kostenvergleich wurde insbesondere auch mit der aufgezeigten Gesamtmethodik ermittelt.

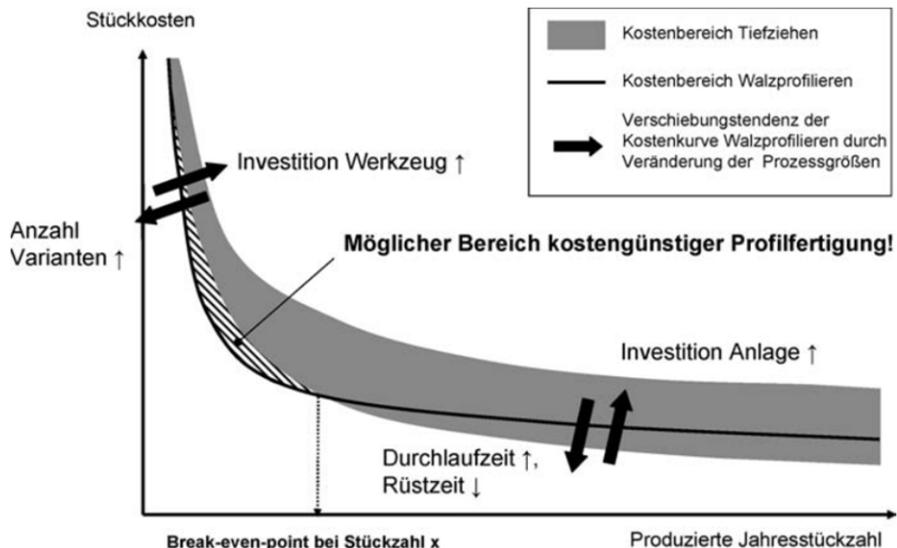


Abb. 7.68 Kostenvergleich von Tiefziehen und Walzprofilieren

Anhand des Verfahrensvergleiches auf Basis der Stückkosten können mögliche Kosteneinsparpotenziale ermittelt und der Einfluss von Profilierprozessgrößen erarbeitet werden. Durch Veränderung von relevanten Prozessgrößen (z. B. Investitionen in Werkzeuge oder eine Erhöhung der Anzahl der Varianten) kann die Kostenkurve des Walzprofilierens in verschiedene Richtungen verschoben werden (vgl. Abb. 7.68). Das grau dargestellte Streuband gibt die realisierbaren Produktionsober- und -untergrenzen der Stückkosten für das Tiefziehen an. Mit der Änderung der Kostenkurve eines beispielhaft berechneten Walzprofilteils gegenüber einem Pressteil ändert sich auch der Break-even-point bei der Stückzahl x. Oberhalb dieses Wertes ist das Tiefziehen am unteren Rand des Kostenbereichs billiger.

Mit der entwickelten Planungs- und Bewertungsmethodik können frühzeitig produktivere, flexiblere und rentablere Fertigungslösungen für Profilbauteile ermittelt werden.

7.7 Digitale Fabrik in KMU

Bei der Einführung der DF stehen KMU vor der Herausforderung, bestehende Strukturen und Abläufe an die Bedürfnisse der DF anzupassen. Zudem finden bei ihnen seltener Planungen statt und es sind kaum Fachleute

für das Thema verfügbar. Vermöglichlich hohe Investitionskosten und laufende Kosten schrecken darüber hinaus von der Einführung ab.

In der Regel finden sich isolierte Medien und Planungswerkzeuge in einzelnen Bereichen, die eine fehlende Datendurchgängigkeit zur Folge haben. Diese Medienbrüche werden bei KMU durch eine heterogene Werkzeuglandschaft mit gewachsenen Lösungen weiter verstärkt. Den höchsten Verbreitungsgrad unter den IT-basierten Werkzeugen finden immer noch Office-Anwendungen und CAD-Programme. Zudem existieren häufig noch Planungsbereiche, die nicht durch IT-basierte Werkzeuge unterstützt werden.

In der Praxis sollte beim IT-Einsatz auf eine KMU-geeignete Vorgehensweise geachtet werden. Dabei stellt sich oft eine Kombination bestehender Methoden und Instrumente mit neuen Werkzeugen als wirtschaftliche und zielführende Lösung heraus.

„Werden in bestimmten Bereichen Planungen relativ selten durchgeführt, ist es ratsam, diese an einen Dienstleister zu vergeben. In Bereichen mit hoher Planungshäufigkeit ist die Investition in Soft- und Hardware sowie in kompetentes Personal die wirtschaftliche Entscheidung“ (Kobylka und Kurtzke 2015, S. 31).

In den folgenden Abschnitten werden anhand ausgewählter Praxisbeispiele vorzugsweise für KMU geeignete Vorgehensweisen zur Einführung einzelner Methoden und Werkzeuge der DF in verschiedenen Bereichen dargestellt.

7.7.1 Projektmanagement bei KMU

Da es bei KMU selten hauptamtliche Planer gibt, ist sowohl zur Durchführung übergreifender Planungsaufgaben als auch zur Einführung neuer IT-basierter Werkzeuge eine kompakte Projektorganisation notwendig (vgl. 6.2.2 und 6.3.2).

Im Gegensatz zu KMU verfügen Großunternehmen häufig über spezialisierte Planungsabteilungen zur Erbringung kontinuierlich notwendiger Planungsleistungen wie der Fabrikplanung. In KMU ist dies aufgrund der geringeren verfügbaren Mittel für Planungsleistungen sowie der Fokussierung fast aller MitarbeiterInnen auf das Tagesgeschäft meist nicht der Fall. Hier existieren allenfalls Beauftragte, die sich neben den Aufgaben des Tagesgeschäfts auch noch um die Organisation und Durchführung von Planungsprojekten kümmern. Der inhaltliche Umfang dieser Aufgaben übersteigt allein oft schon die Zeit, die für die Bearbeitung zur Verfügung steht. Erschwerend kommt häufig hinzu, dass die zu einer erfolgreichen Planung nötigen Grundlagen nicht in hinreichender Weise vorhanden sind:

so sind beispielsweise die Layoutpläne der betroffenen Bereiche nicht auf dem aktuellen Stand, oder es fehlt an der zur Planungsunterstützung benötigten Soft- und Hardware.

Unter diesen Voraussetzungen leidet in den meisten Fällen die Ergebnisqualität des Planungsprojektes. Hierfür ist neben den geschilderten Problemen noch eine weitere Ursache zu nennen: Obwohl in der Praxis bei der Auswahl der Projektbetrauten meist fachliche Gesichtspunkte die Hauptrolle spielen, kommt es auch vor, dass Projektteilnehmer abgestellt werden, die in ihrer Abteilung gerade entbehrlich sind.

7.7.2 Einführung von 3D-CAD und Einsatz von VR in der Fabrikplanung

Mit zunehmender Bedeutung der IT-basierten Planung wird in vielen KMU eine unzureichende Qualität der Daten für den Bereich der Fabrikplanung deutlich. Zur Umsetzung der Methoden und Werkzeuge der DF bedarf es neben der Bereitstellung von 3D-Produktdaten auch entsprechender Fabrikdaten zu Gebäuden und Produktionsanlagen, zur Medienversorgung, Fördertechnik und zu sonstigen Einrichtungen. Wesentliche Erfolgsfaktoren bei der Durchführung einer auf 3D-CAD basierenden Fabrikplanung bei KMU sind die Gestaltung einer auf die Unternehmensprozesse abgestimmten Systemarchitektur und eines durchgängigen Datenmanagementsystems. Die Fabrikplanung ist ein grundlegender Baustein, der sich in die DF nahtlos einfügen muss. Die Potenziale moderner 3D-CAD-Systeme und deren Verknüpfung mit VR können dann die Planungsprozesse entscheidend unterstützen.

Der fabrikplanungsrelevante Datenbestand liegt besonders bei KMU größtenteils in 2D-Zeichnungen vor. Eine Überführung der kompletten Altbestände in 3D-Dateien ist aufgrund des Aufwands und der meist bestehenden Abweichungen zur Realität wirtschaftlich nicht vertretbar. Vielmehr gilt es, stufenweise und projektbezogen die notwendigen Daten aus 2D in 3D zu übertragen oder vor Ort neue 3D-Daten zu erfassen und den Ist-Zustand sukzessive korrekt abzubilden (Bracht und Reichert 2010).

Im Rahmen des Einsatzes von Methoden und Werkzeugen der DF für die Planung, speziell die Layoutplanung, ist VR zu einem der wichtigsten Werkzeuge (vgl. Abschnitt 4.8.3) zunehmend auch für KMU geworden.

In der Fabrikplanung kann VR zunächst als Werkzeug zur Planungsunterstützung genutzt werden. Durch die Visualisierung großer Datenmengen und komplexer Sachverhalte wird die Planungsgeschwindigkeit gesteigert und auch bezogen auf Planungsaktivitäten relativ unerfahrener MitarbeiterInnen ein intuitiver Zugang zu dem behandelten Planungsproblem ge-

schaffen. Weiterhin ermöglichen die vereinfachte Variantenbildung sowie die frühzeitige Fehlererkennung, Planungsaufwände und -kosten signifikant zu reduzieren. Durch die Nutzung der VR als Basis für die Kooperations- und Kommunikationsplattform der DF wird die wesentliche Grundlage für eine weitgehende interdisziplinäre Zusammenarbeit geschaffen. Zudem steigen durch die Möglichkeit der Einbeziehung „Betroffener“ in die Planungsaktivitäten die Planungsqualität und letztlich auch die Akzeptanz des erzielten Planungsergebnisses (Bracht und Masurat 2002; Eckert und Masurat 2005).

Für den sinnvollen, effizienten und nutzbringenden VR-Einsatz sind verschiedene Aspekte von besonderer Bedeutung, die in traditionellen Planungsprozessen entweder gar keine Rolle spielten oder nur eine sehr untergeordnete Bedeutung hatten. Hier ist zunächst die Frage der Grunddatenbeschaffung anzusprechen. Bei der Mehrzahl der KMU sind aktuelle Planungsdaten nicht oder nicht vollständig verfügbar. Dies röhrt auch aus der schon erwähnten Tatsache her, dass umfangreichere Planungen häufig immer noch den Charakter des Einmaligen haben. Es fehlt daher die Motivation, beispielsweise Gebäudepläne bei kleineren Umbauten oder Erweiterungen mit zu pflegen. Speziell bei den ersten mit VR-Unterstützung durchzuführenden Projekten sind hier Erfahrung und Augenmaß gefragt, um durch Techniken zur Datenaufnahme schnell alle zur VR-Modellierung erforderlichen Grunddaten zu erhalten. Hierbei muss es sich nicht zwangsläufig immer um Laserscanning, Photogrammetrie oder andere hochtechnologische Verfahren handeln.

Zum Zwecke der Fabrikplanung ist es ausreichend, wenn die einzelnen Maschinen und sonstigen Betriebsmittel die tatsächlichen Außenabmessungen aufweisen und für den Betrachter einen Wiedererkennungswert haben. Die in der Abbildung 7.69 dargestellte Vorgehensweise in 6 Schritten hat sich in der Praxis als wirtschaftliche und zweckmäßige Lösung erwiesen.

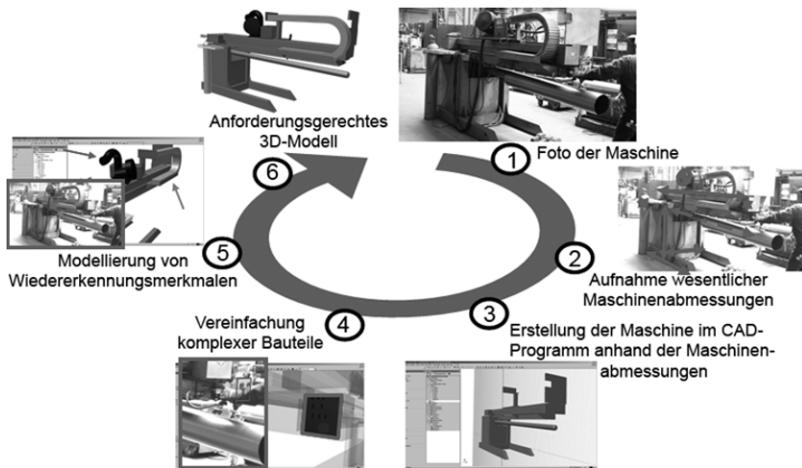


Abb. 7.69 Vorgehensschritte zur Modellierung einer Maschine in 3D-CAD für die Fabrikplanung

Unter Wirtschaftlichkeitsaspekten bietet sich für KMU die in den vorhergehenden Abschnitten erläuterte projektbezogene Vorgehensweise an. Ein Hauptaspekt für das Gelingen eines Planungsprojektes unter Einsatz von VR ist die Partizipation der am Planungsprozess Beteiligten. Generell ist sie eine grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung eines Planungsprojektes, da ein ständiger Austausch sowohl innerhalb des Unternehmens als auch zwischen Dienstleister und Planungsteam des Unternehmens erfolgen muss.

Grundsätzlich lässt sich die für die VR-Nutzung notwendige Datengenerierung und -visualisierung auf drei Ebenen verteilen: Projektebene, Datenebene und Visualisierungsebene, wie das Ablaufschema nach Eckert (2006) in Abbildung 7.70 aufzeigt.

Die Projektebene umfasst diejenigen Prozessschritte, die dem Ablauf des Planungsprojektes folgen. Hier ist die Zielplanung sowohl des gesamten Projektes als auch der Teilprojekte bzw. Prozessschritte entscheidend. Sie führt zur Aufstellung des Projektplans, der im Fortgang des Planungsprojektes gegebenenfalls iterativ angepasst werden kann. Aus dem Projektplan sowie dessen Teilzielen wird die Entscheidung abgeleitet, das gesamte Planungsprojekt oder auch nur einen Teil mit VR-Techniken zu unterstützen. Wichtig ist hierbei, dass der Einsatz von VR grundsätzlich in jeder Projektphase stattfinden kann und nicht nur auf späte Phasen beschränkt ist.

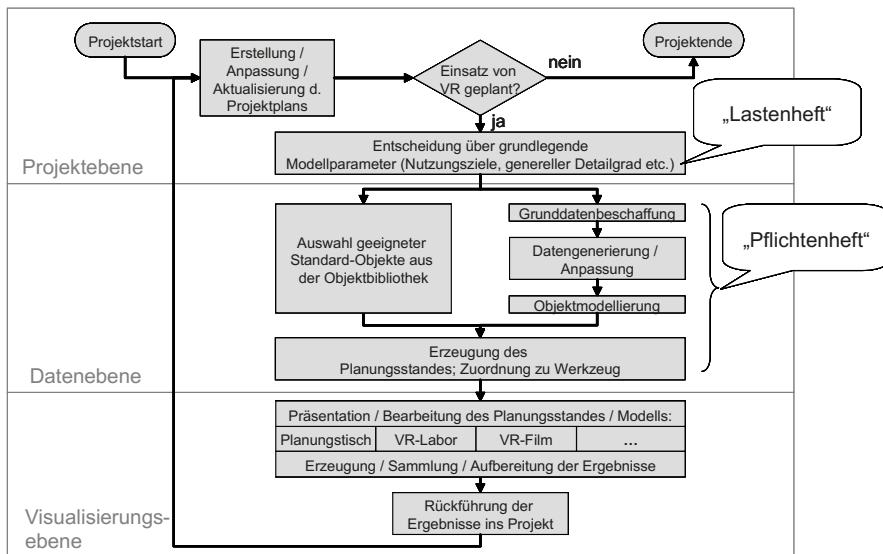


Abb. 7.70 Ablaufschema zur Datengenerierung und -visualisierung mit VR in Planungsprojekten für KMU

Wenn die Entscheidung über die grundlegenden Modellparameter, z. B. hinsichtlich Detaillierung, getroffen ist, findet die technische Ausführung auf der Datenebene statt. Im Sinne eines „Pflichtenheftes“ müssen die Anforderungen der Projektbeteiligten in konkrete technische Spezifikationen der zu erstellenden Objekte und Modelle umgesetzt werden. Grundsätzlich besteht die Wahl, vorhandene VR-Objekte aus einer Standardbibliothek zu nutzen oder neue Objekte zu erstellen, die den realen Gegebenheiten besser entsprechen.

Eine große Rolle spielen hierbei die von den Projektbeteiligten formulierten Anforderungen an die VR-Visualisierung. Geht es beispielsweise darum, lediglich einen groben Eindruck vom Endzustand einer zu planenden Halle mit Maschinen und Anlagen zu erzeugen, werden in der Regel VR-Standardobjekte ausreichen. Sollen die realen Gegebenheiten aber für eine VR-Präsentation z. B. für Vorstandssitzungen oder Genehmigungsverfahren visualisiert werden, wird die detaillierte Modellierung einer großen Anzahl von zusätzlichen VR-Objekten nötig werden.

Ein wichtiger Faktor ist also der Aufbau einer Objektbibliothek. Gerade bei den ersten mit Hilfe von VR durchgeführten Planungsprojekten ist es in der Regel nicht zu erwarten, dass die betreffenden KMU eine ausreichend bestückte VR-Objektbibliothek ohne vorhandene Vorleistungen aus eigener Kraft erzeugen können. Ein solcher Versuch würde anfangs zur

ausschließlichen Verwendung von nicht standardisierten Objekten zwingen und würde einen unvertretbaren Modellierungsaufwand bedeuten.

Vernünftigerweise gehen immer mehr Hersteller von VR-Software dazu über, einen Grundbestand an Standardobjekten mit ihrer Software auszuliefern, so dass zumindest eine erste Grundlage für die eigene Objektbibliothek vorhanden ist.

Die grundsätzliche Vorgehensweise der Modellerstellung und -zuordnung zum VR-Werkzeug ist nach Eckert (2006) in drei Hauptphasen unterteilt in Abbildung 7.71 dargestellt. Der unterschiedliche Detailgrad der Objekte entsteht durch Datenreduktion oder entsprechende Modellierung.

In Phase 1 wird zunächst ein sogenanntes Master-Modell erstellt. Es repräsentiert den logischen Vater aller später in einem VR-Werkzeug eingesetzten Kind-Modelle. Zu seiner Erzeugung werden Standardobjekte aus der Objektbibliothek der VR-Software oder der 3D-CAD-Planung eingesetzt, die gegebenenfalls mit neu erstellten Objekten kombiniert werden können. Falls ein Modell schnell benötigt wird, für das kein Standardobjekt oder keine Grunddaten vorliegen, kann auch auf einfache Platzhalter zurückgegriffen werden. Platzhalter sind Quader, die entsprechend ihrer Bedeutung im Modell (Maschinen, Fördertechnik usw.) farblich codiert sind und den ungefähren Außenmaßen der Objekte entsprechen. Die Arbeit mit Platzhaltern ist noch vor der Verwendung von Standardobjekten die einfachste Art, auch in den Frühphasen einer Neuplanung schnell ein bearbeitbares Modell bereitzustellen.

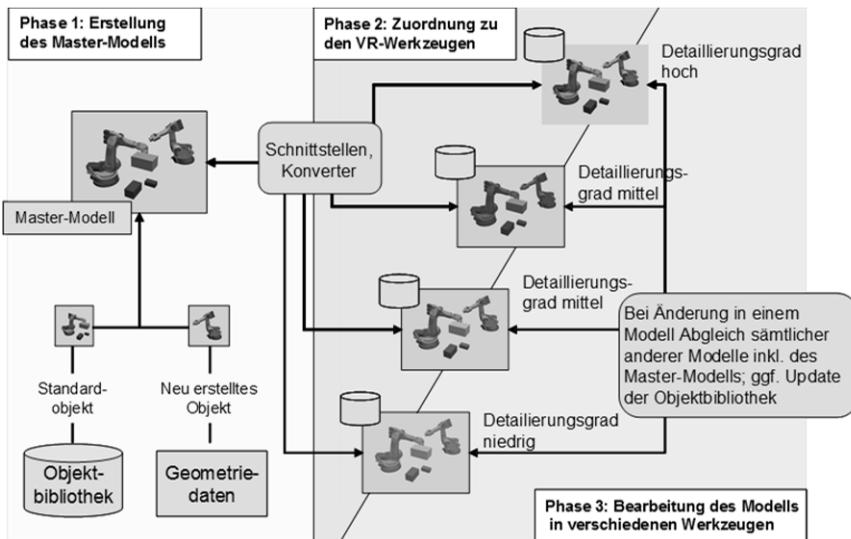


Abb. 7.71 Phasen der Modellerstellung und Zuordnung zum VR-Werkzeug

Wenn die Planung voranschreitet und die Planungsdetails konkreter hervortreten, können die Platzhalter zunächst durch Standardobjekte und je nach Bedarf auch durch „Nicht-Standardobjekte“ ersetzt werden, wenn die entsprechend detaillierten Grunddaten vorhanden sind. Auf diese Weise wird es möglich, in aufeinander folgenden Projektphasen mit bis zu drei Detaillierungsstufen zu arbeiten. Innerhalb des Projektes ist der Grad der Detaillierung im Master-Modell immer am höchsten, da die Kind-Modelle sämtlicher VR-Werkzeuge von ihm abgeleitet werden müssen.

Es kann vorkommen, dass der Detaillierungsgrad eines abgeleiteten Kind-Modells gegenüber dem Master-Modell reduziert werden muss, um den Anforderungen eines bestimmten VR-Werkzeugs Rechnung zu tragen; eine nachträgliche Erhöhung ist jedoch ausgeschlossen. Sämtliche neu erstellten Objekte werden danach in die Objektbibliothek übernommen, wo sie für zukünftige Projekte als Standardobjekte zur Verfügung stehen.

Ist das Master-Modell entsprechend den Angaben der Projektbeteiligten und den Rahmenbedingungen des Planungsprojektes erstellt, kann es den zu nutzenden VR-Planungswerkzeugen zugeordnet werden (Phase 2 in Abb. 7.71). Entsprechend den unterschiedlichen Dateiformaten und Detaillierungsgraden sind dabei Schnittstellen bzw. Konverter einzusetzen, die das jeweils benötigte Dateiformat mit dem gewünschten Detaillierungsgrad erzeugen. Es bietet sich an, sämtliche aus dem Master-Modell abgeleiteten Kind-Objekte in einer werkzeugspezifischen Datenbank zusam-

menzufassen und entsprechend abzuspeichern, so dass eine zukünftige erneute Konvertierung des entsprechenden Objekts entfällt.

Auf der Visualisierungsebene ist es durch dieses Konstrukt möglich, in der Phase 3 nach Abbildung 7.71 ein Modell in verschiedenen Planungsständen mit unterschiedlichen Werkzeugen sukzessive und iterativ zu bearbeiten. Die in die werkzeugspezifischen Datenbanken eingetragenen Werte können genutzt werden, um den Planungsstand eines Werkzeugs auf ein anderes Werkzeug zu übertragen, damit es dort weiter bearbeitet werden kann.

Dies bedeutet beispielsweise, dass ein am Planungstisch (vgl. Abschnitt 4.11.2) partizipativ mit Entscheidern erstelltes Groblayout mit auf der Großprojektion (vgl. Abschnitt 4.11.3) visualisiert und interaktiv begangen werden kann. Die Ergebnisse der Diskussion können dann am Planungstisch weiter umgesetzt werden. Nach einer erneuten Präsentation auf der Großprojektion wird unter Nutzung der detaillierten Objekte des Master-Modells ein „Flug durch die Halle“ als Film aufbereitet.

Die unter Verwendung der VR-Werkzeuge gesammelten Erkenntnisse fließen zurück in das Projekt, in dem sie gegebenenfalls zur Grundlage einer erneuten Zielplanung der folgenden Teilprozesse werden. Spätere Planungsstände können also auch rückwirkend auf das Master-Modell übertragen werden. Ein solches rückwärts gekoppeltes Vorgehen versetzt Planer und Modellierer in die Lage, bereits in der Phase der Grobplanung unter ausschließlicher Verwendung von Standardobjekten erste Planungsschritte mit VR durchzuführen. Die Standardobjekte können dann später teilweise durch neu modellierte ersetzt oder ergänzt werden, ohne den aktuellen Planungsstand im Master-Modell aufwendig nachführen zu müssen. Damit ist sichergestellt, dass die Anforderungen eines speziellen Planungsproblems an das VR-Modell mit den jeweiligen Operationen Verschieben, Hinzufügen und Löschen von Objekten an jedem Werkzeug erfüllt werden, ohne dass die Verknüpfung mit den auf anderen Werkzeugen genutzten Modellen verloren geht.

Die zu erreichende Nutzungsintensität eines VR-Modells, das mit dem oben beschriebenen Vorgehensmodell erzeugt wird, ist in Abbildung 7.72 schematisch dargestellt.

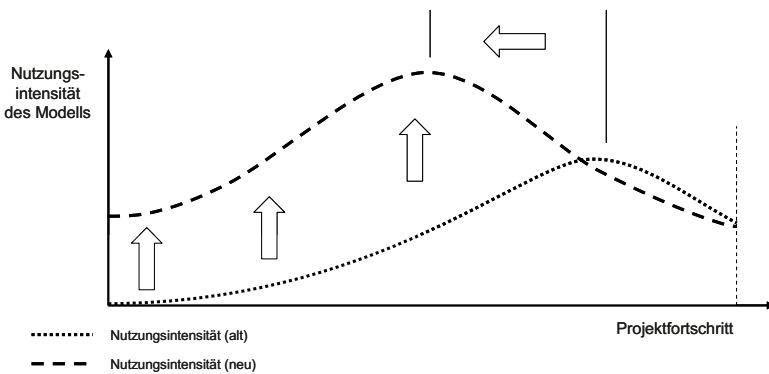


Abb. 7.72 Verstärkung der Nutzungsintensität eines VR-Modells durch Verlagerung in die frühen Planungsphasen (Frontloading)

Die in Abbildung 7.72 dargestellte Kurve basiert auf detaillierten Aufzeichnungen der Nutzungsintensität aus sechs Industrieprojekten (Neuplanungen/ Erweiterungsplanungen), die am IMAB unter Anwendung des Vorgehensmodells durchgeführt wurden (Eckert 2006). Bei ausschließlicher Verwendung von Nicht-Standardobjekten erreicht die Intensitätskurve relativ spät im Projekt ihren Höhepunkt (gepunktete Linie). Steht ein Modell durch die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells der Mitverwendung von Standardobjekten eher zur Verfügung, können im Projektfortschritt auch früher Fragestellungen mit VR-Unterstützung gelöst werden. Das Maximum der Nutzungsintensität erhöht und verschiebt sich zeitlich nach vorn (gestrichelte Linie).

In Abbildung 7.73 wird an zwei qualitativen Kurven dargestellt, wie sich der Modellierungsaufwand bisher im Ablauf von Projekten auswirkte und sich bei Anwendung des neu entwickelten Vorgehensmodells darstellt.

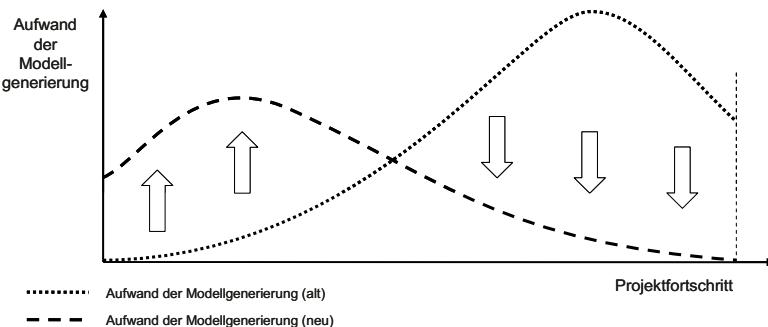


Abb. 7.73 Verlagerung des Aufwands der Modellerstellung

In bisherigen Projekten stieg der Modellierungsaufwand stetig und erreichte im späten Projektlauf sein Maximum (gepunktete Linie). Mit der neuen Vorgehensweise steigt der Modellierungsaufwand in einer frühen Projektphase an und fällt dann deutlich ab. Hauptgrund hierfür ist die Kombination von 3D-CAD-Objekten mit Standardobjekten aus der Bibliothek, die entweder direkt oder mit geringen Modifikationen genutzt werden. Dieser Effekt verstärkt sich mit jedem neuen Projekt, da die neu erzeugten Objekte in die Bibliothek aufgenommen werden und somit zu Standardobjekten werden.

Die Verläufe des Modellerstellungsaufwands ähneln jenen, die auch für die Aufwandsverlagerung bei der Nutzung von Werkzeugen der DF angenommen werden (Bierschenk 2005; Wiendahl et al. 2002).

Mit dem Einsatz von VR lassen sich sehr wirklichkeitsgetreue virtuelle Bilder mit einem hohen Widererkennungswert erzeugen. Die Abbildung 7.74 zeigt ein Praxisbeispiel, in denen das digitale Modell und die spätere reale Umsetzung einer Anlagenplanung verglichen werden.



Abb. 7.74 Gegenüberstellung VR-Modell (oben) und Realität (unten) am Beispiel einer Anlagenplanung

Schon im VR-Modell sollten viele Randbedingungen, wie Schutzzäune oder Bereitstellungsflächen berücksichtigt werden. Dadurch steigt die Planungsqualität; die spätere reale Umsetzung entspricht im Wesentlichen dem digitalen Modell. Auch im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und der Fördertechnikplanung helfen VR-Modelle, die Planung möglichst umfassend gegen Kollisionen abzusichern. Voraboptimierungen minimieren Nacharbeiten und helfen Kosten zu reduzieren (Beesten 2012).

7.7.3 Erweiterte virtuelle Fabrikmodelle

Am IMAB der TU Clausthal wurde ein neuer Ansatz entwickelt, um geometriebasierte VR-Modelle durch Informationen und aktive Funktionskomponenten zu erweitern und damit die Implementierung und Anwendung layoutbezogener Planungs- und Visualisierungsverfahren im virtuellen Modell zu vereinfachen (Abb. 7.75). In der technischen Umsetzung werden dazu bestehende Modellelemente mit .NET-Objekten verknüpft, die in einer objektorientierten Datenbank gehalten werden.

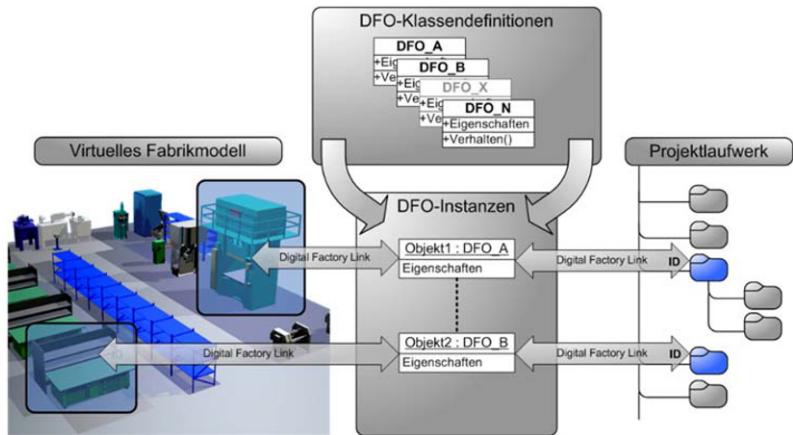


Abb. 7.75 Erweiterung eines DF-Modells

Im Gegensatz zu objektrelationalen Ansätzen, bei denen Objektstrukturen in Schemata eines herkömmlichen relationalen Datenbankmanagementsystems (RDBMS) abgebildet werden, ist die direkte Speicherung der Objekte im DF-Modell insgesamt fehlerunanfälliger und auf Grund der erreichten Performanz besser für die VR-Echtzeitanwendung geeignet (Bracht und Schlange 2010).

Um die Modellerweiterung in der Praxis einsetzen zu können, wurde eine VR-gestützte Gesamtplanungslösung zur teambasierten Struktur- und Layoutplanung, kurz TeamPlan, entwickelt. Grundlage dieser Software ist eine modulare und offene Systemarchitektur auf Basis der .NET-Plattform, in die vorhandene bzw. neue Softwarekomponenten einfach integriert werden können. Ausgangspunkt der Modellerweiterung sind 3D-Fabrikmodelle, die mittels CAD-Schnittstelle in das VR-System importiert werden. Dabei hat sich insbesondere das im Umfeld der DF verbreitete JT-Format als geeignet erwiesen, mit dem Struktur, Geometrie und Materialeigenschaften des Originalmodells weitgehend unverfälscht übernommen werden können.

Im Kern von TeamPlan steht ein VR-System, das neben dem 3D-Rendering der virtuellen Fabrikmodelle u. a. die Benutzerinteraktion besorgt. Auf Grund der Komplexität typischer 3D-Fabrikszenarien werden dabei hohe Anforderungen an Renderingleistung und Darstellungsqualität gestellt. Um eine Bearbeitung des Layouts zu ermöglichen, müssen darüber hinaus effiziente Verfahren zur Objektselektion sowie -manipulation zur Verfügung stehen. Wichtig ist ebenfalls eine Funktionalität, um mehrere Layouts in unterschiedlichen Fenstern bearbeiten zu können. In Verbindung mit der freien Konfigurierbarkeit der graphischen Oberfläche wird

damit ein wichtiger Grundstein für den werkzeugübergreifenden Einsatz gelegt.

TeamPlan wird u. a. für den Betrieb einer VR-Großprojektionsanlage sowie eines 2D/ 3D-Fabrikplanungstisches genutzt. Im letzteren Fall lässt sich die Oberfläche der Software in zwei Bereiche aufteilen, eine orthogonale Ansicht zur Bearbeitung des Layouts auf dem Planungstisch sowie eine perspektivische 3D-Ansicht, die mittels Projektor großflächig dargestellt werden kann (siehe Abbildung 7.76 links bzw. rechts).

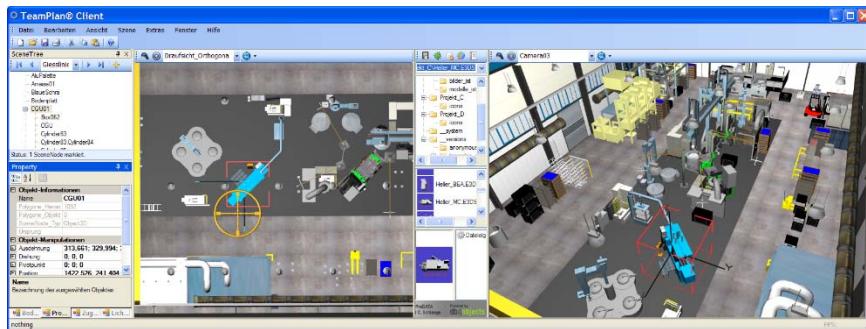


Abb. 7.76 Exemplarische Oberflächenkonfiguration von TeamPlan

Durch die beispielhafte Umsetzung einer Vorgehensweise zur Ist-Aufnahme sowie einer wegetreuen Materialfluss- und Prozessvisualisierung im virtuellen Modell konnte der Mehrwert der erweiterten Fabrikmodelle für die VR-gestützte Struktur- und Layoutplanung von Schlange (2010) in seiner Dissertation belegt werden.

7.8 Die Digitale Fabrik im Schiffbau

Nicht nur die Automobilindustrie, sondern speziell der deutsche und europäische Bau von Container- und Kreuzfahrtschiffen spürt den scharfen internationalen Wettbewerb. Laut Aussage der Meyer Werft in einem Abschlussbericht für das Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie (2003) wird die deutsche Schiffbauindustrie in Zukunft nur dann am Markt bestehen können, wenn sie „durch gezielte Forschung und Entwicklung hochwertige Produkte nach dem neuesten Stand der Technik zu wettbewerbsfähigen Preisen mit kurzen Lieferzeiten anbieten kann“ (2003, S. 7). Die Individualität der Produkte, die flexible Reaktion bei Kundenwünschen und technische Veränderungen bis kurz vor Fertigstellung des Schifffes stellen die Rahmenbedingungen im Schiffbau dar. Sie

beeinflussen in höchstem Maße die Gestaltung der Abläufe in Entwurf und Fertigung und die Steuerung der Material- und Informationsflüsse. Komplexe Produkte bedingen zwangsläufig eine effektive Nutzung der Ressourcen einer Werft und eine effiziente Planung und Logistik.

Wie in anderen Industriezweigen sind auch beim Schiffbau konventionelle Planungstechniken an ihre Grenzen gestoßen. Die in der Vergangenheit eingesetzten Werkzeuge, wie beispielsweise die traditionelle Netzplantechnik, erlauben keine realitätsnahe Berücksichtigung der ständigen Veränderungen in Produkt und Fertigung. Daher werden zusätzliche Methoden, wie z. B. Simulation, Expertensysteme, neuronale Netze und Optimierungsmethoden, genutzt, um die Planungsqualität zu verbessern.

Hartmann (2008), der die Methoden der DF inzwischen als integrierten Bestandteil der Planungsumgebung bei der Meyer Werft sieht, bezifferte bereits 2008 die Vorteile durch den Einsatz von Methoden der DF mit einer Verringerung der Planungszeiten um mehr als 50 %. Neben dieser Nutzenquantifizierung nennt er als qualitative Nutzenaspekte eine

- Verbesserung der Entscheidungsgrundlage für Vergabestrategien,
- Erhöhung von Transparenz und Planungssicherheit,
- Verbesserung der Ressourcennutzung sowie projektübergreifende Ressourcenplanung (Fläche und Personal),
- Umsetzung einer prozessorientierten Planung und eine
- Erhöhung der Planungssicherheit.

Die Ablaufsimulation wird laut Steinhauer (2011) seit Mitte der 1990er Jahre an die Herausforderungen der Unikatproduktion im Schiffbau angepasst und regelmäßig eingesetzt. Eine in diesem Zusammenhang eingesetzte Lösung ist ein speziell für den Schiffbau zugeschnittener Simulationsbausteinkasten STS (STS – Simulation Toolkit Shipbuilding), der auf einem Standardsimulationswerkzeug aufsetzt und Bausteine zur Modellierung von schiffbaulichen Produktionen enthält (vgl. Steinhauer 2008).

Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen Schiffbau und Bauwesen wird heute in branchenübergreifenden Kooperationen wie SIMoFIT (Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering, vgl. <http://www.simofit.com/>) die simulationsgestützte Planung von Ausbauprozessen gemeinsam weiterentwickelt.

7.9 Digitale Fabrik in der Getränkeindustrie

Die Getränkeindustrie ist durch Marktstrategien geprägt, die immer wieder neue firmen- bzw. produktsspezifische Behältnisse und ereignisspezifische

Verpackungen hervorbringt. Damit müssen Produkte und Produktvarianten oftmals nur noch in vergleichsweise kleinen Losen produziert werden. „Waren frühere Produktionsstätten dadurch gekennzeichnet, sehr große Stückzahlen einer überschaubaren Menge von Produkttypen in wenige Standardbehälter abzufüllen, entwickelt sich der Faktor „Flexibilität“, z. B. durch die Einführung von Mixgetränken in der Brauereibranche, firmenspezifischer Reliefflaschen oder einer eventspezifischen Etikettierung für große Sportereignisse wie der Olympiade, zu einer Schlüsselfähigkeit im Bereich der Getränkeabfüllung“ (vgl. Bernhard und Kahe 2008, S. 199). In der Getränkeindustrie sind die Anlagen somit durch eine hohe technische Flexibilität, eine rüstzeitoptimierende Produktionsplanung und eine flexible Logistik zur bedarfsgerechten Ver- und Entsorgung der Linie gekennzeichnet. Letztere reicht bis zur Einbindung der Beschaffung, Distribution und Redistribution in ein übergeordnetes Supply Chain Management.

Der Einsatz digitaler Planungsmethoden und ihre Integration in ein Gesamtkonzept zur digitalen Anlagenprojektierung sind damit heute in der Getränkeindustrie wichtige Aufgabenfelder. Die bisherige Nutzung der Simulation bezog sich weitestgehend auf die Modellierung und Analyse von Einzelaspekten, wie beispielsweise die Untersuchung von Abfülllinien einschließlich der angeschlossenen Verpackungslinien (Günthner und Kadachi 2001; Voss 2004; Voigt 2004). Heute ist die Simulation zur Untersuchung umfassender Fragestellungen der Intralogistik bereits Standard (vgl. Bernhard und Kahe 2008), ebenso wie die simulationsgestützte Absicherung einer Anlagenneuplanung bereits in der Angebotsphase (vgl. Bernhard und Duve 2008).

Ergänzend hierzu wird auch eine daten- sowie eine prozesstechnische Integration der digitalen Planungsmethoden umgesetzt. So verfolgt beispielsweise die KHS GmbH mit dieser Integration in Anlehnung an die DF das Ziel, ein kompetenter Lösungsanbieter für die digitale Produktions- und Logistikplanung in der Getränkebranche zu sein und mit der Übergabe der physischen Anlage auch die digitale Anlage zu liefern. Basis hierfür sind quantifizierbare Kundenreferenzprozesse für den Material- und Informationsfluss, die als Wissensbasis bei der KHS GmbH hinterlegt sind. Zur Strukturierung der Wissensbasis dienen im Bereich der Produktion typische Grundeigenschaften einer Abfülllinie wie die Behälterart, die Nennleistung der Anlage sowie Ausstattungsdetails zur Verpackung und Palettierung. Im Bereich der Intralogistik sind es Kenndaten für Lager-, Transport- und Kommissioniersysteme sowie die integrierten IT-Systeme für Produktion und Logistik.

Die weitergehenden Entwicklungen zur Umsetzung der DF in der Getränkeindustrie haben eine vollständige und integrierte Engineeringlösung für die technische Auslegung eines ganzen Getränkestandorts zum Ziel.

Ausgehend von der Maschinenkonstruktion werden im Liniendesign die Auslegung, Gestaltung und simulationsbasierte Absicherung der Produktionsanlage und deren IT-Infrastruktur sowie der zu erwartenden Lebenszykluskosten bearbeitet. Darüber hinaus wird auch häufig die umgebende Intralogistik dimensioniert und simulationsgestützt ausgeplant.

Während bei der KHS GmbH im Liniendesign zur durchgängigen 3D-Planung integrierte Workflows entwickelt werden, fokussieren die Entwicklungen in der simulationsbasierten Produktions- und internen Logistikplanung auf standardisierte hauseigene Bausteinbibliotheken sowie ihre wechselseitige Integration. Ergänzt werden die Lösungen um ein vollständiges Lebenszykluskostenmodell für das KHS-Produktpotfolio sowie die PDM-gestützte Umsetzung der Integration zur Produktentwicklung.

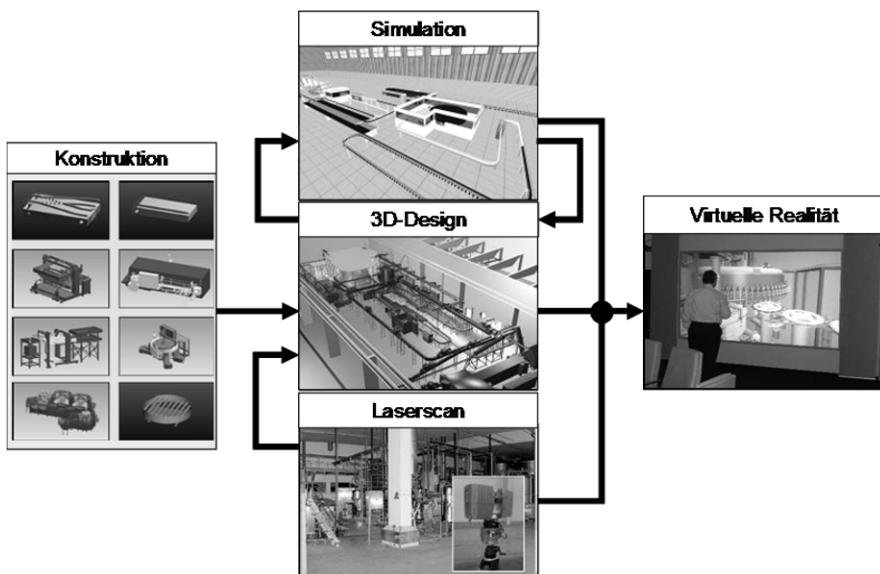


Abb. 7.77 Integrationskonzept zur DF in der Anlagenplanung (Quelle: KHS GmbH, Dortmund)

Als digitale Planungsmethoden kommen beispielsweise die 3D-Konstruktion, die 3D-Layoutplanung, die Simulation, Lärmprognosen, das Laserscannen (vgl. hierzu auch Abb. 4.5 in Abschnitt 4.3.3) und die VR zur Darstellung und Überprüfung der Planungsergebnisse in einem virtuellen Raum zum Einsatz (Beispiel eines VR-Modells siehe Abb. 7.78).

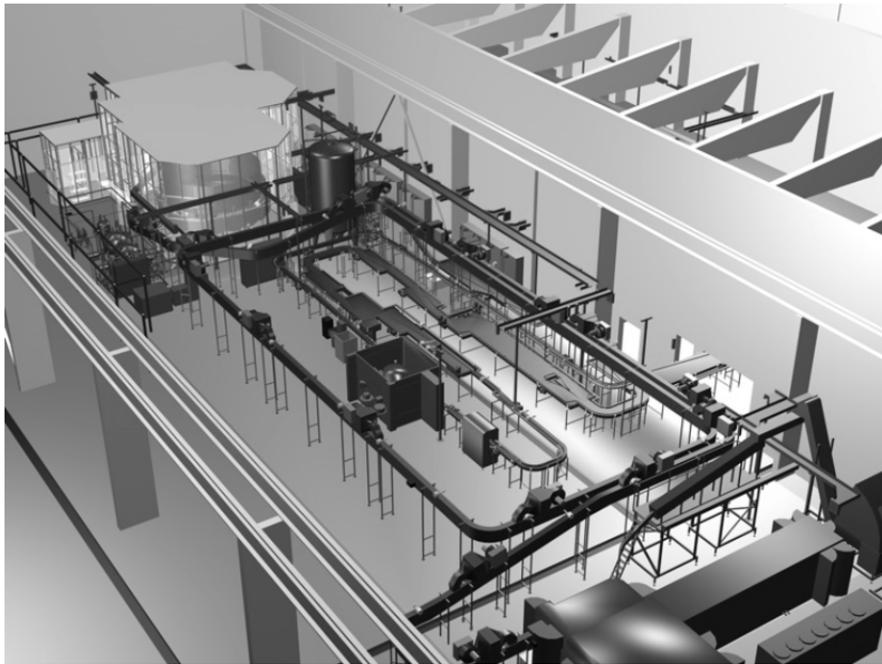


Abb. 7.78 VR-Modell für die Getränkeindustrie mit Darstellung realistischer Lichtverhältnisse (Quelle: KHS GmbH, Dortmund)

Bei der KHS GmbH soll die VR als Integrationsmethode zur gezielten Kommunikation, Kollaboration und Qualitätssicherung im Anlagenentstehungsprozess dienen. Ziel ist daher die konsequente VR-Nutzung über den Anlagenlebenszyklus von der Maschinenkonstruktion über das Anlagendesign bis zur Realisierung. Die hierzu einzusetzenden Methoden sowie der entsprechende Workflow zwischen den einzelnen Fachabteilungen und Aufgaben sind in Auszügen der Abbildung 7.79 zu entnehmen.

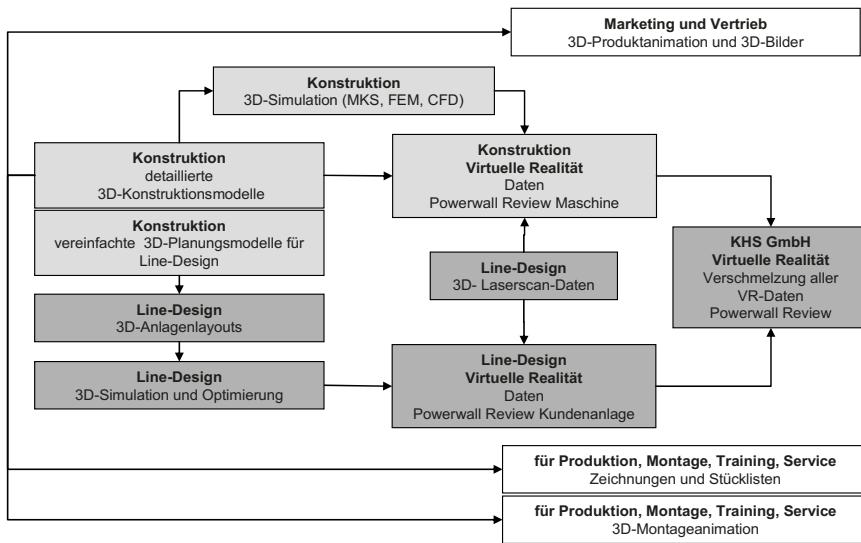


Abb. 7.79 Virtuelle Planungswelt im Anlagenbau für die Getränkeindustrie (Legende: MKS – Mehrkörpersimulation; FEM – Finite-Element-Methode; CFD – Computational Fluid Dynamics – numerische Strömungsmechanik; VR – Virtuelle Realität) (Quelle: KHS GmbH, Dortmund)

Die durchgängige Ausweisung und Analyse der Lebenszykluskosten schafft darüber hinaus die Basis für eine objektive Investitionsentscheidung der Kunden. Gleichzeitig ist sie die langfristige Basis für die strategische Produktentwicklung bei der KHS GmbH in Bezug auf ökonomische und ökologische Aspekte. Basis der durchgängigen Nutzung der digitalen Planungsmethoden stellt die Verknüpfung aller Kundenanforderungen, Informationen zu den Anlagenkomponenten mit ihren jeweiligen Steuerungen sowie Planungsinformationen in einem konsistenten Informations- und Datenmodell dar.

7.10 Einsatz mobiler Endgeräte für die Fabrikplanung

Unternehmen im globalen Verdrängungswettbewerb müssen ständig und schnell auf Veränderungen reagieren können. Das Konzept der DF unterstützt diese Forderungen und will nutzerspezifisch aktuelle und konsistente Daten bereitstellen (Spillner 2012). In diesem Kontext bietet der Einsatz mobiler Endgeräte große Potenziale, die bei systematischer Nutzung die

mobile Verfügbarkeit von Planungs- und Betriebsdaten gewährleisten und so schnelle Reaktionen ermöglichen (vgl. auch Silcher et al. 2015).

7.10.1 Grundlagen

Ausgehend von Recherchen am Markt verfügbarer Anwendungen und von Analysen der mobilen Endgeräte, welche systematisch die Verknüpfung der Funktionalitäten wie beispielsweise Kamera, GPS (GPS – Global Positioning System) und Bewegungssensor betrachten, können neue Anwendungsmöglichkeiten für die DF abgeleitet werden (Bracht und Sontag 2013).

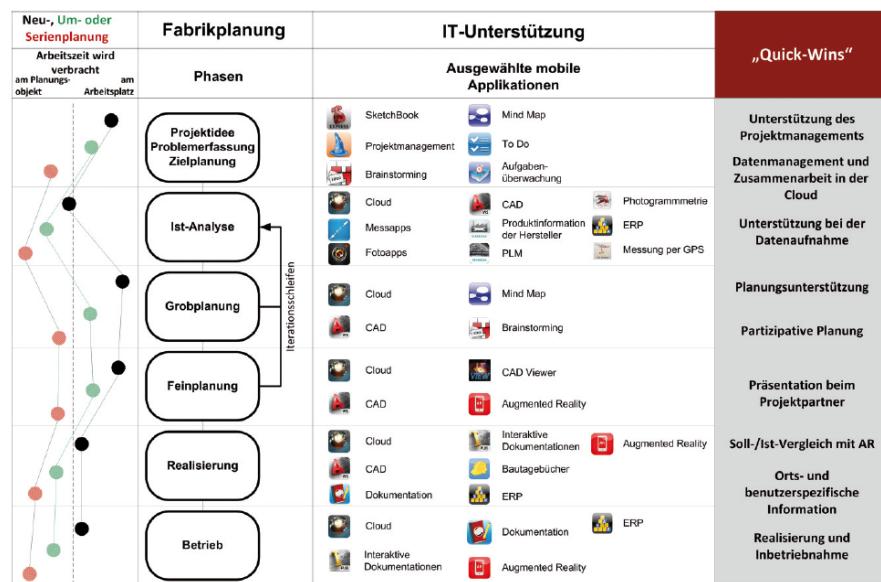


Abb. 7.80 Unterstützung des Fabrikplaners durch mobile Applikationen

Es gibt bereits zahlreiche Apps, deren Funktionen sich bei der Fabrikplanung anwenden lassen und Potenziale zur Unterstützung des Planers aufweisen. Einige davon wurden in Abbildung 7.80 entsprechend ihrer Funktionen den Planungsphasen zugeordnet. Die Unterstützung durch smarte Apps hat die größten Potenziale in den Phasen, bei denen der Planer nicht an seinem festen Arbeitsplatz ist. Das kann etwa die Datenaufnahme oder ein Datenabgleich vor Ort am Planungsobjekt sein.

7.10.2 Mobile Anwendungen für die Digitale Fabrik

Durch die Verknüpfung von verschiedenen Funktionen ergeben sich völlig neue Potenziale, die es im Bereich der DF zu nutzen gilt. In Abbildung 7.81 sind beispielhaft einige der Applikationen aufgezeigt, die eine hohe Relevanz für dieses Themengebiet aufweisen.



Abb. 7.81 Anwendungsbeispiele für mobile Anwendungen in der DF

Die Anbieter von Werkzeugen der DF offerieren heute Apps, die auf bestehenden PLM-Systemen aufbauen. So bietet Siemens Industry Software Inc. eine App an, mit der sich der Nutzer über das Internet mit seinem Teamcenter-Server verbinden und sich auf diesem Weg zu jeder Zeit und an jedem Ort aktuelle Informationen wie CAD-Daten oder Stücklisten beschaffen kann. Eine ähnliche App stellt Bentley Systems seinen Kunden mit dem Project Wise Explorer zur Verfügung. Für den CAD-Bereich gibt es zunehmend Applikationen, die die Darstellung oder sogar Bearbeitung von CAD-Zeichnungen ermöglichen. Allerdings sind die Fingereingabe und die meist recht kleinen Displays der mobilen Endgeräte nicht für die CAD-Konstruktion geeignet, so dass der Nutzen solcher Apps (z. B. Inventor Publisher) vor allem in der Betrachtung von CAD-Daten zu sehen ist.

Aus dem Consumer Bereich kommen ebenfalls viele Applikationen, die Potenziale für den Einsatz mobiler Endgeräte in der DF beinhalten. So gibt es beispielsweise Apps, in denen Fotos nachträglich mit Informationen,

wie z.B. Bemaßungen oder Bemerkungen versehen werden können. Dies ermöglicht eine Verdichtung der Informationen bei der Datenaufnahme. Im Bereich der verfügbaren Business-Apps sind es u. a. Applikationen zur Unterstützung des Projektmanagements und der Kommunikation. Neben nativen Applikationen besteht auch die Möglichkeit Groupware, die beispielsweise auf Webservern läuft, mit dem mobilen Endgerät aufzurufen und unterwegs zu verwenden. Als ein Beispiel sei hier der SharePoint von Microsoft genannt.

Einige der verfügbaren Anwendungen zielen bereits jetzt auf den Einsatz in der DF ab, andere lassen sich, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, übertragen. Des Weiteren gestattet die Verknüpfung von Funktionen beispielsweise von Kamera, Email und GPS das sofortige Verschicken eines Fotos mit Ortsangabe, z. B. von einem aufgetretenen Problem auf der Baustelle. Dadurch kann zum einen umgehend mit der Behebung des Fehlers begonnen werden, zum anderen wird der Auftrittsort des Fehlers dokumentiert. Außerdem bietet es sich an, Informationen, wie aktuelle Bestände oder Auftragsengpässe, bedarfsgerecht auf dem mobilen Endgerät zur Verfügung zu stellen.

Da das mobile Endgerät den permanenten Zugriff zum Intranet/Internet gewährt, kann der Nutzer jederzeit die Datenbanken seines Unternehmens einsehen. Durch die Verbindung der Kamerafunktion mit den bereitgestellten Informationen ergeben sich so viele Einsatzmöglichkeiten, beispielsweise lassen sich über das Scannen eines Barcodes detaillierte Informationen einer Anlage oder eines Bauteils abrufen. Diese können dann direkt in das Kamerabild als erweiterte Realität eingeblendet werden. Mittels der Positions- und Lagebestimmungen kann das mobile Endgerät die Position und die Blickrichtung bestimmen, wodurch sich weitere AR-Anwendungen ergeben.

7.10.3 App-Entwicklungen zur Projektinformation, Datenaufnahme und Layoutabsicherung

Das Projekt-Informations-System (PIS) ist die zentrale Projektmanagementplattform des Instituts für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB). Der Ansatz beruht auf einer methodischen Verknüpfung bestehender und neuer Anwendungen und Systeme (Reichert 2010). Je nach Standort des Nutzers erfolgt der Zugriff über das World Wide Web (WWW) oder ein Lokal Area Network (LAN). Durch eine Webapplikation ist der Zugriff über mobile Endgeräte an jedem Ort möglich. Das System ist dabei so ausgelegt, dass eine direkte Kommunikation über gesicherte Internetverbindungen mit dem Planungssystemen des IMAB möglich ist.

Die modulare Struktur erlaubt das Hinzufügen von weiteren Datenbanken und Anwendungen. In Abbildung 7.82 sind die derzeitigen Hauptanwendungen des PIS dargestellt.



Abb. 7.82 Hauptanwendungen des Projektinformations-Systems PIS (Quelle: IMAB)

Das PIS-Webportal dient zur zentralen Projektinformationsbereitstellung und stellt alle Anwendungen in Form von Webapplikationen oder über eine Verknüpfung mit den native Apps zur Verfügung. Der Sharepoint-Server ermöglicht die Koordination und Kommunikation von Terminen, Aufgaben und Planungsinformationen. Die Verwaltung der 3D-CAD-Daten wird von einem Produktdatenmanagement-Server (PDM-Server) übernommen. CAD-Modelle werden dort parallel zum native CAD-Format im JT-Austauschformat vorgehalten, um u. a. über die Weboberfläche auf das mobile Endgerät geladen und mit einem entsprechenden Viewer betrachtet werden zu können (Bracht und Sontag 2013).

Das Modul der Datenaufnahme ist speziell auf mobile Endgeräte mit kleinem Display angepasst und führt den Planer schrittweise durch die Da-

tenaufnahme. Strukturiert aufgebaute Eingabemasken helfen bei der Dateneingabe und stellen sicher, dass alle notwendigen Daten aufgenommen werden (Abbildung 7.83).



Abb. 7.83 Smarter Datenaufnahmehilfsmittel

Je nach Art des Projektes werden nur die zur Planung relevanten Daten abgefragt, so dass der Prozess der Datenaufnahme möglichst effizient durchgeführt werden kann. Bei einem Simulationsprojekt werden bspw. nur Zeiten und Materialflüsse erfasst, die für die Simulation relevant sind, wohingegen bei einer Layoutplanung detaillierte Maschinen- und Hallendaten aufgenommen werden (Sontag 2014). Alle Daten werden unmittelbar auf den PDM-Server übertragen und stehen somit allen Projektmitarbeitern zentral zur Aufbereitung und Planung zur Verfügung. Zur Bewertung von Planungsalternativen bietet das PIS ein Tool zur Nutzwertanalyse. Durch den Einsatz des PIS auf mobilen Endgeräten lässt sich die Lücke zwischen dem operativen Betrieb und der mehr theoretischen Anlagenplanung sowie der Forderung des Lean Managements nach kleinen Regelkreisen weiter schließen.

TeamPlan ist eine am IMAB entwickelte VR-gestützte Gesamtplanungslösung zur teambasierten Struktur- und Layoutplanung (Schlange 2010). Den Kern von TeamPlan bildet der TeamPlan-Client, über den virtuelle Modelle verwaltet, angezeigt und innerhalb unterschiedlicher Planungsverfahren genutzt werden können (siehe auch Abschnitt 7.7.3). Der

TeamPlan-Client ist auf unterschiedlichen Planungswerkzeugen, wie beispielsweise einem Planungstisch oder VR-Labor, aber auch auf mobilen Endgeräten z. B. mit einem Windows Betriebssystem (Abbildung 7.84) lauffähig.



Abb. 7.84 TeamPlan auf einem mobilen Endgerät

Dadurch lassen sich virtuelle Begehungen in Großprojektionen, partizipative Planungssitzungen und auch die Überprüfung kurzfristiger Layoutanpassungen vor Ort auf einem Tablet-PC durchführen. Die 3D-Objektbibliothek von TeamPlan ist mit dem zentralen PDM-Server des IMAB synchronisiert und stellt somit sicher, dass es keine redundante Datenhaltung gibt und die Planer immer mit dem richtigen Planungsstand arbeiten. Aus der Bibliothek können komplett Fabrikmodelle geladen oder einzelne Maschinen und Anlagenteile in ein 3D-Layout eingefügt und beliebig angeordnet werden. Um den Planer bei der Layoutoptimierung zu unterstützen, stellt der Client diverse Möglichkeiten der Prozess- und Materialflussvisualisierung zur Verfügung. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass die Anwendung von TeamPlan auf mobilen Endgeräten nicht für die Planung ganzer Fabriklayouts, sondern eher für einen Soll-/Ist-Vergleich oder zur Absicherung einzelner Maschinenumstellungen vor Ort geeignet ist.

7.10.4 Apps und Drohnen zur Kombination von Realität und Virtualität

AR-Technologien ermöglichen eine visuelle „Anreicherung“ der zur Verfügung stehenden Informationen mit computergenerierten Zusatzinhalten (Bracht und Brosch 2013a). Diese können sowohl in alphanumerischer Form – z.B. Betriebszustände, Kennzahlen – als auch in grafischer Form – z.B. 3D Modelle von Anlagen oder Maschinen – vorkommen. Bei der Verwendung mobiler Endgeräte zeichnet dabei die Kamera ein Bild der realen Szene auf, die erweiterte Realität wird in diesem Bild eingeblendet und die Informationen erscheinen gemeinsam auf dem Bildschirm des Endgerätes. Die Positionierung der Zusatzinhalte lässt sich dabei grundsätzlich in markerloses und markerbasiertes Tracking aufteilen. Vielversprechende Einsatzbeispiele für AR-Anwendungen wurden im Projekt Avilus aufgezeigt, einem BMBF-Projekt auf dem Gebiet der Virtuellen Techniken, (Schreiber und Zimmermann 2012).

So ist es beispielsweise möglich, Servicetechniker via AR bei ihrer täglichen Arbeit zu unterstützen, indem ihnen zur Tätigkeit passende Daten und/oder Arbeitsanweisungen vor Ort zur Verfügung gestellt werden und sie bei der Arbeit auftretende Probleme oder Hinweise für weitere Serviceeinsätze direkt im System vermerken können. Dadurch soll den sich ständig ändernden räumlichen Gegebenheiten und dem steigenden zeitlichen Druck der Servicetechniker Rechnung getragen werden.

Dieses Konzept lässt sich auch auf den Einsatz in der DF übertragen. Abbildung 7.85 zeigt beispielhafte eine Anwendung im Bereich der Fabrikplanung. Hier wird ein Tablet PC zur Einblendung von Zusatzinformationen in die reale Umgebung benutzt.



Abb. 7.85 Mobile AR im Rahmen der Fabrikplanung

Sobald der Tablet PC den 2D-Marker am Boden erkennt, wird die 3D-Darstellung einer geplanten Maschine in der Position des Markers eingeblendet. So können schnell und unkompliziert verschiedene Aufstellflächen erprobt werden, um erste Einschätzungen der Maschinen-anordnung zu erhalten. Darüber hinaus ermöglicht die Applikation die Einblendung mehrerer Maschinen zur selben Zeit. So können verschiedene Szenarien durchgespielt und in einem ersten Schritt abgesichert werden. Die Anwendung würde es ebenso ermöglichen Ver- und Entsorgungseinrichtungen von Maschinen einzublenden oder Produkte zu visualisieren.

Sind die möglichen Perspektiven für den Anwender mit einem Tablet PC begrenzt, so wird eine Drohne eingesetzt, um die Reichweite zu vergrößern und beispielsweise auch Top-views mit einem besseren Überblick über das Layout zu ermöglichen.

Den Einsatz einer Drohne zur zielgerichteten und effektiven Datenaufnahme zeigen die Abbildungen 7.86 und 7.87. Aufgrund der kompakten Größe, der hohen Auflösung, der einfachen Handhabung und den außerordentlich guten Flugeigenschaften ist der Einsatz auch innerhalb von Gebäuden möglich (Bracht und Brosch 2013b).

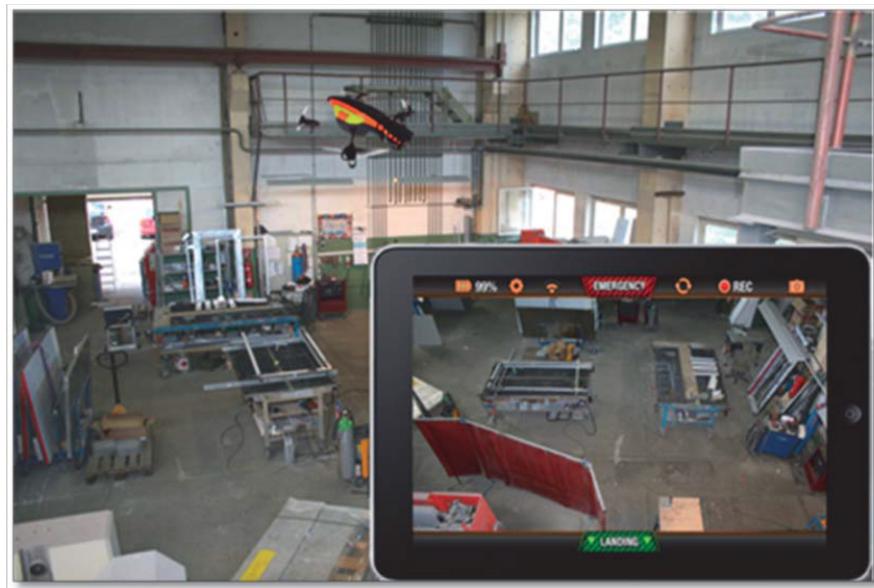


Abb. 7.86 Hallendraufsicht mit einer Parrot AR.Drone und einem Tablet PC

Der mit einer oder mehreren Kameras ausgestattete Quadrocopter kann sogar in schwer zugänglichen Bereichen genutzt werden (vgl. auch Bauernhansl et al. 2012). Durch die Echtzeitübertragung der Bilder kann die Drohne mit dem mobilen Endgerät sicher gesteuert werden (Brosch 2014). Die in der Drohne integrierte Kamera und die WLAN-Verbindung gestaltet eine direkte Übertragung des Videos auf den Tablet PC, auf dem dann wiederum AR-Inhalte in das Abbild integriert werden.

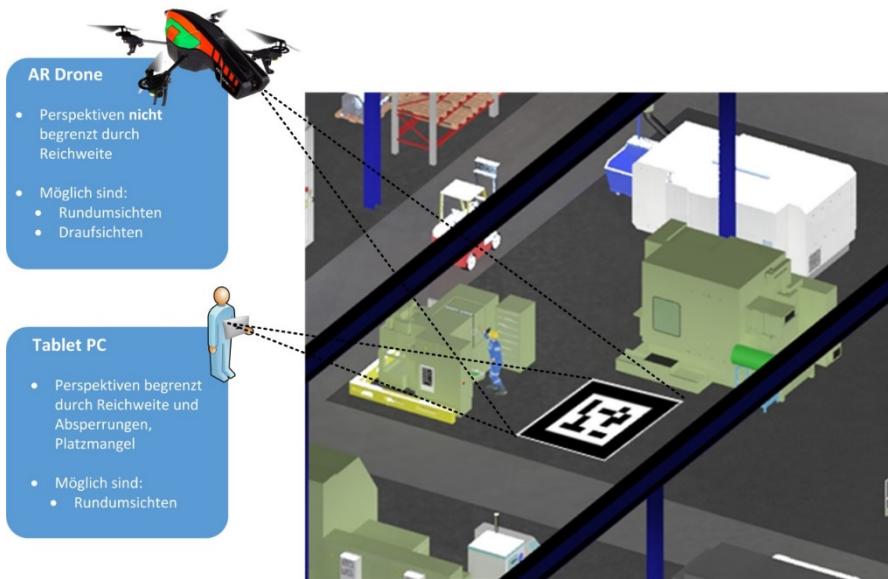


Abb. 7.87 Prinzipbild zum Mobile AR mit AR-Drohne und Tablet PC

Anwendungsgebiete sind u. a. die Vorabüberprüfung von geplanten Maschinenaufstellungen unter bestimmten Rahmenbedingungen. Dabei zielt die Überprüfung nicht auf eine genaue Kollisionsüberprüfung und den Abgleich von Medienanschlüssen ab, sondern eher auf die generelle Eignung des geplanten Aufstellungsortes bezüglich der Platzverhältnisse oder die Betrachtung zur Verfügung stehender Varianten.

Eine weitere Möglichkeit, auf mobilen Endgeräten Informationen aus verschiedenen Werkzeugen der DF kombiniert darzustellen, verfolgt der neue Ansatz eines VR-Monitorings, in welchem wichtige logistische Zustandsgrößen in eine layoutbasierte 3D-Darstellung integriert werden (Abbildung 7.88).

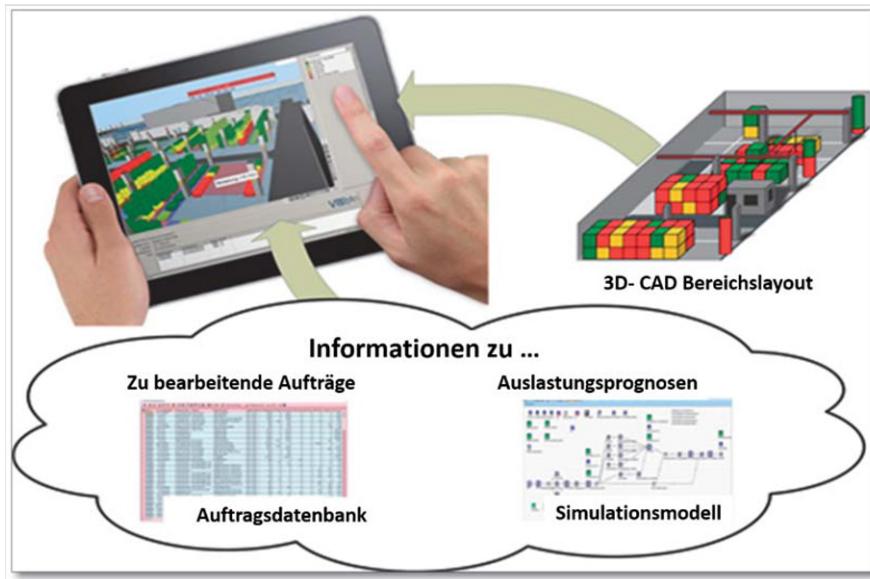


Abb. 7.88 Kopplung von Echtzeitmonitoring mit Simulationsergebnissen auf Tablet PCs (Hackenberg 2011)

Ein Ausschnitt des Verladebereichs eines CKD-Logistikzentrum wird hier mittels des VR-Monitorings abgebildet. Dem Anwender ist es so möglich, in die virtuelle Realität des dargestellten Verpackungsbetriebs einzutauchen (Bracht et al. 2011). Gleichzeitig stehen durch die direkte Koppelung mit Simulationsmodellen Prognoseredaten für die nächsten Tage zur Verfügung und terminkritische Aufträge oder Engpässe können frühzeitig erkannt werden.

7.11 Digital Lean Factory – eine Vision?

7.11.1 Grundlagen

Für den Erfolg im globalen Wettbewerb ist die Effizienz der Fabriken und ihrer Produktion entscheidend. Als Vorbild können dabei die als Lean Production bezeichneten Produktionssysteme – in Deutschland auch als Ganzheitliche Produktionssysteme bekannt – bezeichnet werden. Unter einer Lean Factory soll eine Fabrik verstanden werden, in welcher ganzheitliche Prinzipien, ausgehend von einem Lean Management / einer Lean

Production, in wesentlichen Punkten und mit einem hohen Reifegrad implementiert sind (Bracht und Quasdorff 2016).

Die beispiellose Entwicklung der IT hat wesentlichen Einfluss auf die Produktentwicklung, die Produktion, die Planung und Überwachung der Produktionsanlagen und damit auch auf die Art und Weise zu produzieren. In wichtigen Branchen, wie z. B. der Automobilindustrie, wird die Planung der Produktionssysteme seit einigen Jahren verstärkt durch das Konzept der Digitalen Fabrik unterstützt.

Im Rahmen einer Dissertation (Quasdorff 2016) wurde am IMAB der TU Clausthal untersucht, wie sich das Konzept der DF in dieLean Philosophie einfügt und wie sich beide Konzepte gegenseitig beeinflussen bzw. ergänzen. Berücksichtigung fand dabei auch die unter dem Schlagwort Industrie 4.0 zusammengefasste Entwicklung mit ihren zahlreichen Schnittpunkten zur DF. Zentraler Bestandteil dieser Analyse sind die Ergebnisse einer umfassenden Delphi-Studie mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2025 unter Einbeziehung zahlreicher Experten aus Praxis, Beratung, Forschung und Lehre.

7.11.2 Ist die Zukunft digital, lean und smart?

Die DF vernetzt bzw. integriert Aufgaben von Fabrikplanung und Fabrikbetrieb (Schenk et al. 2014). Das erfordert schlanke und abgestimmte Prozesse und führt diese zu höchster Effizienz. Damit bietet die Lean Factory eine hervorragende Grundlage für die Integration der DF.

Die Ziele und Methoden der Lean Philosophie wirken mit denen der DF eng zusammen und schaffen Synergien (Abb. 7.89).

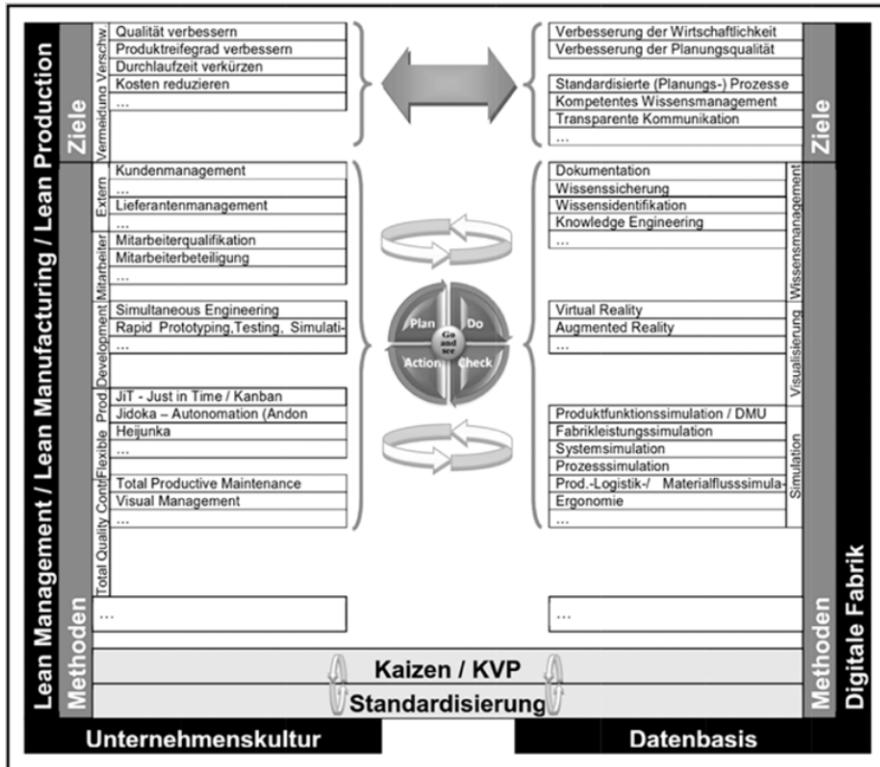


Abb. 7.89 Verknüpfung der Lean Philosophie mit der DF (Quasdorff 2016, S. 97)

Von besonderem Gewicht sind die Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Methoden und die ständige Überprüfung der Ergebnisse und Ziele. Daher kommt dem Prinzip „go and see“ eine besondere Bedeutung zu, um die Daten der DF mit der Realität abzugleichen.

Grundlage des Erfolges der Lean Philosophie ist die Unternehmenskultur und in der DF die Datenbasis. Gemeinsam ist beiden Konzepten eine ständige Verbesserung und Standardisierung, um das Erreichte zu halten.

Lean-strukturierte Prozesse können durch einen ganzheitlichen Informationsfluss noch schneller und flexibler reagieren und erleichtern die Einführung computerunterstützter Prozesse (Schneider und Ettl 2012).

Eine weitere deutliche Performance-Steigerung wird durch die breite Verfügbarkeit produktabhängiger Daten innerhalb des gesamten Wert schöpfungsprozesses und dem Produktlebenszyklus über ein umfassendes PLM erreicht. Das ist die Basis für die digitale Integration der verschiedenen Unternehmensbereiche in ein gemeinsames Wissensmanagement für die optimale Nutzung der Lean Tools.

Eine große Mehrheit der befragten Experten stimmt grundsätzlich der Vereinbarkeit der beiden Konzepte – Lean Factory und DF – zu (Abb. 7.90). Einige sehen die Lean Factory bereits als eine Voraussetzung für eine erfolgreiche DF, da die Komplexität sonst nicht beherrschbar sei.

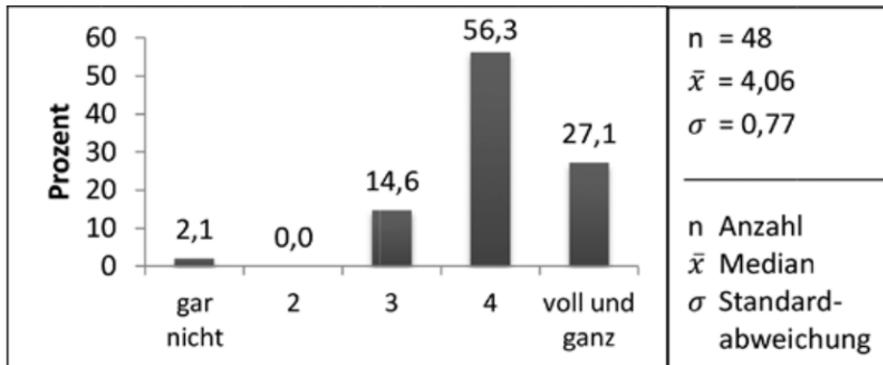


Abb. 7.90 Vereinbarkeit von Lean Factory und DF (Bracht und Quasdorff 2016, S. 844)

Bei entsprechender Entwicklung der Technologien wird die DFsogar als ein Grundpfeiler der zukünftigen Lean Factory gesehen. Der DF wird nach Einschätzung einer breiten Mehrheit der befragten Experten Einfluss auf wesentliche Teilaspekte der Lean Factory, wie dem Simultaneous Engineering, der Standardisierung, dem Rapid Manufacturing, den Lieferantenbeziehungen, dem KVP und der Personalqualifikationen im Unternehmen zugesprochen.

Ein effizienter Einsatz der Informationstechnik im Allgemeinen und der DF im Besonderen ist ein wesentlicher Beitrag für die Effizienz einer modernen Lean Factory.

Weiterhin beklagt die Mehrzahl der Teilnehmer der Studie in der Realität die noch uneinheitliche Datenbasis, die unzureichende Vernetzung, die mangelnde Systemkompatibilität und fehlende Standards – und das auch noch für die nähere Zukunft. Erwartet wird aufgrund des schnellen technologischen Fortschritts eine permanente Lücke bezüglich der Standardisierung und Vernetzung. Es gilt insbesondere darauf zu achten, dass nicht versucht wird, einen mangelhaften Prozess mithilfe von ausgefeilter Technologie zu verbessern, sondern dass der Prozess als solcher verbessert wird (Bracht und Quasdorf 2009).

Im Industrie 4.0-Konzept sieht ein erheblicher Teil der in der Studie befragten Experten für die Zukunft einen Treiber der DF. Ebenso wird aber eine Unterschätzung der Komplexität des Themas Industrie 4.0 befürchtet.

Ein Hinweis auf die enorme Bedeutung schlanker Prozesse und deren Standardisierung, um die Komplexität nicht unnötig zu erhöhen.

Kernelemente der Lean Philosophie sind die Vermeidung von Verschwendungen (Muda), von Uneinheitlichkeit (Mura) und Überbeanspruchung (Muri). So kann die DF durch den umfassenden Einsatz ihrer Methoden und Werkzeuge im Sinne von deren Vermeidung ihren Beitrag leisten, u. a. für die Verbesserung der Produkt- und Planungsqualität, der Fertigungsplanung oder in der Instandhaltung zur Minimierung von Produktionsstillständen. Eine entsprechende Layoutplanung verringert die Zahl unnötiger Transporte, die Montageplanung unter Einsatz der Werkzeuge und Methoden der DF ermöglicht eine optimierte Montage und Bewegungsabläufe der Werker, insbesondere auch aus ergonomischer Sicht.

Eine vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung kann dann auch bei komplexen Teilen für verschwendungsarme Auftragsdurchläufe sorgen (vgl. Arzberger 2016).

7.11.3 Fazit der Digital Lean Factory 4.0

Die Lean Philosophie ist aufgrund ihrer Prozessorientierung für den Einsatz der DF prädestiniert und verfügt mit dieser über eine umfangreiche Schnittmenge. Die Mehrheit der Experten sieht grundsätzlich eine Vereinbarkeit der beiden Konzepte, einige sehen sogar Lean Prozesse als Voraussetzung für eine DF und in Zukunft sogar die DF als Grundpfeiler der Lean Factory. Die DF ist hervorragend geeignet, Prozesse und deren Umfeld weiter zu optimieren und Verschwendungen zu vermeiden. Die DF kann vielfältige Unterstützung im Rahmen des KVP leisten, u. a. durch Simulationen, VR und AR. Von besonderer Bedeutung ist die Einbeziehung der Mitarbeiter auf dem Shop Floor zur Datenerfassung und Partizipation an der DF.

Industrie 4.0 wird für die Zukunft von den Experten als Treiber der DF wahrgenommen. Befürchtet wird eine Unterschätzung der Komplexität der Industrie 4.0. Für die DF und die Industrie 4.0 sind standardisierte und schlanken Prozesse eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz. Die Fabrik der Zukunft könnte eine Digital Lean Factory 4.0 sein.

8 Fazit und Ausblick

Globale Marktanforderungen zwingen Unternehmen, immer häufiger und schneller innovative, preiswürdige neue Produkte hoher Qualität anzubieten. Dies gelingt häufig nur noch durch international vernetztes Arbeiten unter Nutzung einer effizienten Informationsbasis. Die Konzepte der Digitalen Fabrik bieten in diesem Zusammenhang einen bewährten Ansatz, um mit Hilfe einer durchgängigen digitalen Gestaltung der Produkte, Prozesse und Produktionseinrichtungen diesen Anforderungen zu genügen. Zudem stellt die DF mit ihren Modellen und Simulationswerkzeugen eine wichtige Basis für neue vernetzte digitale Anwendungen in Echtzeit im Rahmen von Industrie 4.0 bereit. Damit kann auch der Produktionsstandort Deutschland auf hohem Niveau erhalten und weiterentwickelt werden.

In der Automobilindustrie, die in diesem Technologiebereich eine Vorreiterrolle übernommen hat, sind wesentliche Aspekte der DF bereits umgesetzt. In vielen Planungsbereichen sind die Methoden und Werkzeuge fest etabliert. Die Vorteile werden von den Anwendern erkannt, die Werkzeuge sind intensiv im Einsatz und der Nutzen zeigt sich dabei vor allem in einer Steigerung der Planungsqualität und Verkürzung der Realisierungsdauer neuer Produkte und Fabriken. Zudem können erhebliche Einsparungspotenziale durch die Senkung von Investitions-, Änderungs- und letztendlich auch von Herstellungskosten erschlossen werden.

Darüber hinaus ist die DF mit zunehmender Reife auch für zahlreiche Mittelständler, wie z. B. Anlagenlieferanten, von praktischer Bedeutung. Sie nutzen die Methoden und Werkzeuge zur eigenen Produktentwicklung und -absicherung auch ohne Verpflichtung durch einen großen OEM. Kleine Unternehmen schaffen sich durch eine schrittweise Einführung der DF die Grundlage, neue Produkte – auch bei kleinen Serien – schneller anbieten zu können.

Allerdings sind in vielen Unternehmen und in Teilen auch in der Automobilindustrie die beiden Grundvoraussetzungen, die für einen nachhaltigen Erfolg der DF und für eine Umsetzung einer vertikalen und horizontalen Integration im Rahmen von Industrie 4.0 zwingend sind, noch nicht erfüllt. Diese betreffen zum einen die Einführung von integrierten und standardisierten Prozessen, Methoden und Werkzeugen und zum anderen die Umsetzung eines durchgängigen Datenmanagements.

Die in diesem Buch aufgezeigte Bandbreite der digitalen Methoden und Modelle verdeutlicht die Vielfalt und die methodische Komplexität, die sich hinter dem Konzept der DF verbirgt. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass nur eine einfache Skalierbarkeit der DF ihre Anwendbarkeit sicherstellt. Ein durchgängiges Datenmanagement kann damit nur in Abhängigkeit vom Bedarf der jeweiligen Anwendung zielführend umgesetzt werden. Die Integration der digitalen Methoden und Modelle in übergeordnete PLM-Lösungen, das Zusammenwachsen von SCM- und PLM-Werkzeugen oder auch die oben erwähnte Umsetzung einer vertikalen und horizontalen Integration im Rahmen von Industrie 4.0 stellen die informationstechnische Herausforderung der Zukunft dar. Allerdings werden nur Standardisierungen auf der Ebene der IT-Systeme, der Methoden und Modelle sowie der Werkzeuge und Schnittstellen aufwandsarme Anpassungen an neue Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die wandlungsfähige Fabrik, ermöglichen.

Ergänzend zur informationstechnischen Standardisierung besteht ein ständiger Bedarf an organisatorischen Verbesserungen. Dafür müssen hinsichtlich der Aufbauorganisation entsprechende, flexible Projektteams und bezüglich der Ablauforganisation Regeln für das Datenmanagement definiert werden. Um Entwicklungszeiten zu verkürzen und die Ergebnisqualität zu erhöhen, gilt es mehr denn je, Geschäftsprozesse auch in der Produktionsentstehung durch Workflowmanagementsysteme zu unterstützen und zu standardisieren. Damit stehen den Mitarbeitern die richtigen Informationen zur richtigen Zeit im richtigen Datenformat zur Verfügung, um wertschöpfende Arbeiten in den Vordergrund zu stellen und Routinetätigkeiten zu minimieren. Untersuchungen zeigen, dass spürbare Effekte durch Verkürzung der Durchlaufzeiten, Vermeidung von Medienbrüchen, höhere Prozesstransparenz, bessere Kostenrechnung und durch Messung von Prozesskennzahlen erreichbar sind.

Die Nutzung eines Digitalen Produktmodells, die Umsetzung eines Workflowmanagements und ein durchgängiges Datenmanagement sind inzwischen bei vielen Unternehmen in der Produktentwicklung Stand der Technik. Integrierte PLM-/PDM-Systeme bilden dabei immer häufiger die Basis. Verglichen damit hat die Produktions- und Fabrikplanung Nachholbedarf. Noch arbeiten die Systeme der DF und die PDM-Systeme der Produktentwicklung nicht überall mit einem gemeinsamen Datenmanagement. Aus Bestrebungen der Softwareanbieter ist aber ersichtlich, dass die vorhandenen Konzepte und Lösungen schrittweise zusammenwachsen.

Unternehmensleitungen sind heute gefordert, strategische Entscheidungen für eine zukünftige Zusammenführung von Produkt- und Produktionsentwicklung zu treffen. Voraussetzung ist eine wesentlich breitere Modularisierung und Standardisierung von Baugruppen und Komponenten, die es

ermöglichen, bisherige starre zentrale Fabriken durch Produktionsnetzwerke mit wandlungsfähigen Fabriken abzulösen. Der Aufwand der IT-technischen Realisierung der Integration von Produkt- und Produktionsentwicklung ist beträchtlich; erste Erfahrungen lassen jedoch auf noch größere Herausforderungen bei der organisatorischen Umsetzung schließen.

Mit der DF wird insgesamt gesehen die Voraussetzung für eine durchgängige Darstellung des Lebenszyklus einer Fabrik geschaffen. Dabei kann eine PLM-Lösung die Grundlage für die Vernetzung der relevanten Daten des Unternehmens bilden. Damit ist zummindest auf informations-technischer Ebene ein wesentlicher Schritt getan, um Entwicklung und Produktion besser zu vernetzen. Allerdings darf der Aufwand für eine unternehmensindividuelle Skalierung und Anpassung der DF nicht unterschätzt werden. Hier sind Unternehmen, Softwarehäuser und Forschungseinrichtungen gleichermaßen gefordert, Wege zur zielgerichteten und standardisierten IT-Umsetzung zu finden.

Neben der IT-Lösung ist deshalb als zweite Voraussetzung die intensive und prozessorientierte Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion zu nennen. In vielen Unternehmen sind noch gedankliche und kulturelle Barrieren zu überwinden, die die DF zu einer spannenden organisatorischen Herausforderung machen. Hier muss das Management eindeutige Zeichen setzen und die neuen Strukturen und Prozesse vorleben. Dabei wird der Mensch als Anwender, z. B. Konstrukteur oder Planer, immer die Basis des Erfolges der DF sein. Nur wenn er spürbare Vorteile in seiner täglichen Arbeit erkennen kann, werden die digitalen Methoden und Werkzeuge eine umfassende Verbreitung finden; allerdings werden sie wohl nie die Kreativität und das umfassende Urteilsvermögen des Menschen gänzlich ersetzen können.

In Zeiten einer anstehenden digitalen Transformation fast aller Unternehmensprozesse kann die DF einen wichtigen Beitrag für eine erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 liefern. Sie sorgt schon bei der Planung der Fabrik für eine umfassende Digitalisierung und simulationsgestützte Optimierung der zu realisierenden Wertschöpfungsprozesse. Die digitalen Modelle und die dynamischen Analysen bilden eine hervorragende Ausgangsbasis für weitergehende vernetzte Echtzeitlösungen im Rahmen von Industrie 4.0 für die intelligente Produktion.

Zukünftig sollte auch die in einer Smart Factory stattfindende umfassende und automatisierte Kommunikation zwischen Material, Maschinen und Menschen sowie die damit angestrebte Effizienzsteigerung vorher virtuell mit den Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik getestet und abgesichert werden.

Literaturverzeichnis

- acatech; Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Berlin: Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft.
- Agteleky, Béla (1987): Fabrikplanung - Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten, unternehmerische und systemtechnische Aspekte. 2. Auflage. München: Hanser (1).
- Alt, R. (2003): Collaborative Computing – der nächste Schritt im Business Networking. In: L. Beyer, D. Frick, Andreas Gadatsch, I. Maucher und H. Paul (Hg.): Vom E-Business zur E-Society – New Economy im Wandel. München, Mering: Hampp, S. 103–127.
- Anderl, Reiner; Mosch, Christian; Rollmann, Thomas (2010): Neutraler Datenaustausch in der Digitalen Fabrik. XML-basierte Beschreibung von fabrikspezifizierenden Daten und Fabrikstrukturen. In: *ZWF* 105 (3), S. 163–167.
- Arenius, M.; Klippert, J.; Ott, A.; Sträter, O. (2013): Ceyeberman: Ein Messsystem zur Ermittlung der Arbeitsbelastung. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 64 (7), S. 36–39.
- Arnhold, D. (2013): Digitale Produktionsprozessplanung variantenreicher Produkte unter Berücksichtigung von intervallbasierten Eingangsdaten. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 29. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Arnold, Dieter; Furmans, Kai (2009): Materialfluss in Logistiksystemen. 6., erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.
- Arzberger, F. (2016): Vernetzte, wertstromorientierte Produktionssteuerung. Für die Auftragsfertigung komplexer Teile aus Strukturwerkstoffen. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 37. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- ASIM (1997): Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. In: *Arbeitsgemeinschaft Simulation in der Gesellschaft für Informatik: Mitteilungen aus den Fachgruppen* Heft 58.
- Autodesk (2011): DXF Reference. Online verfügbar unter http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf, zuletzt geprüft am 18.01.2017.

- Autodesk (2016a): Autodesk 3ds Max. Online verfügbar unter
<http://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview>, zuletzt geprüft am 18.01.2017.
- Autodesk (2016b): Autodesk MotionBuilder. Online verfügbar unter
<http://www.autodesk.com/products/motionbuilder/overview>, zuletzt geprüft am 18.01.2017.
- Autodesk (2016c): FBX-Review. Online verfügbar unter
<http://www.autodesk.com/products/fbx/fbx-review>, zuletzt geprüft am 18.01.2017.
- AWF (1985): CIM – Integrierter EDV-Einsatz in der Produktion – Beispiele, Definitionen, Funktionszuordnungen. Eschborn.
- Balzert, Helmut (2009): Lehrbuch der Softwaretechnik. Basiskonzepte und Requirements-Engineering. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl. (Lehrbücher der Informatik).
- Bär, Thomas (2004): Durchgängige Prozesskette vom digitalen Produkt bis zur realen Fabrik? In: Engelbert Westkämper (Hg.). Automobil Fachkongress 2004. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 29. und 30. Juni 2004. Landsberg: Verl. Moderne Industrie.
- Barz, D. (2012): Entwicklung eines Referenzmodells zur Unterstützung von Fahrzeugprojekten im Rahmen von Badge-Engineering-Kooperationen. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 28. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Bauernhansl, T. (2016): WGP- Standpunkt. Weckruf für Unternehmen. Warum wir ein einheitliches Verständnis für Industrie 4.0 brauchen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (7-8), 453-457.
- Bauernhansl, T.; Krüger, Jörg; Reinhart, G.; Schuh, G. (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0. 48 Seiten. Darmstadt: WGP, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik.
- Bauernhansl, Thomas; Siegert, J.; Haag, H. (2012): Fabrikoptimierung mit Kamera und Beamer. Das „Shop Floor Analyzing Visualization Center“ integriert digitale und reale Welt. In: *wt Werkstattstechnik online* 102 (3), S. 94–97.
- Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>.
- Becker, B.-D. (2004): Praktische Aspekte zur Digitalen Fabrik im Planungsprozess und Anlagenbau. In: Engelbert Westkämper (Hg.). Automobil Fachkongress 2004. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 29. und 30. Juni 2004. Landsberg: Verl. Moderne Industrie.

- Becker, M.; Brenner, C.; Erkollar, A.; Jochem, R.; Klußmann, J. (2000): Beschreibungsmethoden für Referenzmodelle. In: Sigrid Wenzel (Hg.): *Frontiers in Simulation: Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik*. Ghent: SCS, S. 31–54.
- Beesten, H. (2012): Durch 3D-Visualisierung Prozesse optimieren. In: *ZWF* 107 (3), S. 144–146.
- Bening, G.; Zimmer, A. (2006): SOA erfolgreich nutzen. In: *JavaSPEKTRUM* (3), S. 19–22.
- Bergbauer, Jörg (2002): Entwicklung eines Systems zur interaktiven Simulation von Produktionssystemen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 8. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Bergert, M.; Kiefer, J.; Höme, S.; Fedrowitz, C. (2009): Einsatz der Virtuellen Inbetriebnahme im automobilen Karosserierohrbau - Ein Erfahrungsbericht. In: R. Kasper (Hg.). Tagungsband zur 9. Magdeburger Maschinenbau-Tage – Forschung in Bewegung, 30.09. - 01.10.2009, S. 388–397.
- Bernhard, B.; Kahe, T. (2008): Simulation und Modellmanagement in der Getränkeindustrie. In: M. Rabe (Hg.). *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 199–208.
- Bernhard, J.; Duve, H.-P. (2008): Kollaborative Planung und Simulation einer integralistischen Hochleistungsanlage für die Getränkeindustrie. In: C. Engelhardt-Nowitzki, O. Nowitzki und B. Krenn (Hg.): *Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement*. Leobener Logistik Cases. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 69-88.
- Bernhard, J.; Wenzel, S. (2006): Verteilte Simulationsmodelle für produktionslogistische Anwendungen - Anleitung zur effizienten Umsetzung. In: T. Schulze, G. Horton, B. Preim und S. Schlechtweg (Hg.). *Proceedings der Tagung Simulation und Visualisierung 2006*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2. - 3.03.2006. Erlangen: SCS, S. 169–177.
- Bernhard, J.; Wenzel, Sigrid (2004): Eine Taxonomie für Visualisierungsverfahren zur Anwendung in der Simulation in Produktion und Logistik. In: T. Schulze, S. Schlechtweg und V. Hinz (Hg.). *Proceedings zur Tagung Simulation und Visualisierung 2004*. Erlangen, 4.-5. März 2004: SCS, S. 85–96.
- Bernhard, Jochen (2009): Beitrag zur Interoperabilität in der kollaborativen Logistikplanung unter Verwendung der Simulation. Dortmund: Verlag Praxiswissen.
- Bethke, Michael (2005): Einsatz der Simulation zur kontinuierlichen Verbesserung eines unterstützenden Prozesses im Rahmen der Aggregatefertigung eines Automobilherstellers. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der

- Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 12. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Bierschenk, Sabine (2005): Digitale Fabrik jenseits von 2007 – Mit Vernetzung zur echtzeitfähigen Produktion. In: *Intelligenter produzieren* (1), 38-41.
- Bierschenk, Sabine; Kuhlmann, Timm; Ritter, Arno (2005): Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen. Auswertung einer Breitenbefragung. Unter Mitarbeit von Fraunhofer-Institut für Produktions-technik und, Automatisierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bierwirth, Thomas (2004): Virtuelle Logistikplanung für die Automobilindustrie. Methoden und Modelle im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 10. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Bischoff, J.; Taphorn, C.; Wolter, D.; Braun, N.; Fellbaum, M.; Goloverov, A. et al. (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von "Industrie 4.0" im Mittelstand. -Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Blesl, Markus; Kessler, Alois (2013): Energieeffizienz in der Industrie. Berlin u.a.: Springer Vieweg.
- Bleuel, R.; Petzelt, D.; Willmann, C. (2009): Internes Papier zur Richtlinienarbeit der VDI 4499, Blatt 3. Digitale Fabrik - Datenmanagement und Systemarchitekturen.
- Bley, Helmut; Franke, Christina (2001): Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik* 91 (4), 214-220.
- BMW (2015): Studie. Erschließen der Potentiale der Anwendung von "Industrie 4.0" im Mittelstand. Erarbeitet von agiplan GmbH, Fraunhofer IMC und ZENIT.
- Bockel, B. (2008): Simulation und Visualisierung. Erstellung von Musterfabriken für Ausbildung und Lehre. Vortrag während der Impulsveranstaltung Digitale Fabrik - Nutzen und Chancen. 3. März 2008. Universität Kassel.
- Bogdanowicz, Leszek (1997): Ein Konzept zur flexiblen Unternehmens-modellierung und Software-Entwicklung. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.
- Bongiuliami, Luca; Henseler, Patrick; Zwicker, Ekkehard (2003): Das Digitale Produkt – Grundlage für den IT-unterstützten Verkaufs- und Logistikprozess. In: *Industrie-Management* 19 (1), 17-20.
- Booch, Grady; Rumbaugh, James; Jacobson, Ivar (2006): Das UML Benutzerhandbuch. aktuell zu Version 2.0. München: Addison Wesley.

- Bracht, U. (2012): Digitale Fabrik - Umsetzungsstand und operativer Betrieb. Im Tagungsband: SimForum, 4. Oktober, Linz.
- Bracht, U. (2013): Die Digitale Fabrik - Vision und durchgängiger Einsatz. Im Tagungsband: Durchgängige Anlagenplanung. In: Durchgängige Anlagenplanung. Nürnberg, 20. März.
- Bracht, U.; Arzberger, F.; Schulenberg, F. (2015a): Neue Fertigungssteuerung in der Ingenieurkeramik. Digitalisierung, Transparenz und Wertstromorientierung für modulare Konfigurationen. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 109–114.
- Bracht, U.; Barz, D. (2011): Kooperation bei Fahrzeugprojekten im Rahmen des Badge-Engineering. Methode zur Unterstützung der Aufbauphase entsprechender Kooperationen in der Automobilindustrie. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (4), S. 187–193.
- Bracht, U.; Brosch, P. (2013a): Digital Factory goes mobile - Weiterentwicklung der Digitalen Fabrik durch den Einsatz mobiler Endgeräte und Augmented Reality. Im Tagungsband: 10. Fachtagung Digital Engineering. In: 10. Fachtagung "Digital Engineering". Magdeburg, 18.-20. Juni.
- Bracht, U.; Brosch, P. (2013b): Mobile devices and applications for factory planning and operation. Im Tagungsband: Simulation in Produktion und Logistik. In: Simulation in Produktion und Logistik. Paderborn, S. 177–186, S. 177–186.
- Bracht, U.; Brosch, P. (2013c): Neue Perspektiven in der Digitalen Fabrik. In: *Economic Engineering* (6), S. 22–26.
- Bracht, U.; Fischer, A.; Krüger, T. (2017): Mathematische Anordnungsoptimierung und Simulation. Ein kombinierter Ansatz zur Fabriklayoutplanung. In: *wt Werkstattstechnik online* 107 (4), S. 1–6.
- Bracht, U.; Hackenberg, W.; Bierwirth, T. (2011): Monitoringansatz für die operative CKD-Logistik. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (3), 122–127.
- Bracht, U.; Hinrichs-Stark, Wilko Frederik (2015): Kollaboration in logistischen Lieferketten - Mobiles Logistikmanagement mit Social Media. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (11/12), S. 849–855.
- Bracht, U.; Jiao, Y. (2017): Finite-Elemente-Modell für die Drapiersimulation. Methodenentwicklung und FE-Simulation. In: *wt Werkstattstechnik online* 107 (3), S. 118–123.
- Bracht, U.; Kappler, J. (2011): Bedarfsplanung in der Automobilindustrie. Ein Verfahren zur Absatz- und Teilebedarfsplanung bei volatilen Marktverhältnissen. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (3), S. 115–121.
- Bracht, U.; Kohler, A.; Widdmann, B.; Kremer, M. (2012a): Virtuelles Takten neuer Produktgenerationen - Weiterentwickelte Ansätze der Digitalen Fabrik

- zur optimierten Planung realgemischter Endmontagen. In: *wt Werkstattstechnik online* 102 (9), S. 44–49.
- Bracht, U.; König, Alexander; Spies, J. (2012b): Integration des Fabrik-DMU in die Planungsprozesse der Fabrikstrukturplanung. Elemente für das Erstellen von gewerke-übergreifenden virtuellen Gesamtfabrikmodellen. In: *wt Werkstattstechnik online* 102 (3), S. 103–108.
- Bracht, U.; Lüddecke, M. (2013): Entscheidungsunterstützung im Logistikmanagement - Effizientes Engpassmanagement durch neuartige Visualisierung und Elemente der Digitalen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (3), S. 169–176.
- Bracht, U.; Lüddecke, M. (2015): Anwenderzentrierte Entscheidungsunterstützung. Intelligente Visualisierung für das Engpassmanagement der Materiallogistik in der Automobilindustrie. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 128–135.
- Bracht, U.; Quasdorff, O. (2016): Die Lean Factory - Basis für den Erfolg von Digitaler Fabrik und Industrie 4.0. In: *ZWF* 111 (12), S. 843–846.
- Bracht, U.; Reichert, Johannes (2010): Digitale Fabrik auf Basis der 3D-CAD-Fabrikplanung. In: *wt Werkstattstechnik online* 100 (4), 247–253.
- Bracht, U.; Ritz, W. (2016): Digitale Absicherung einer Decklackierkabine-Methodenentwicklung und numerische Simulation. In: *wt Werkstattstechnik online* 106 (5), S. 364–369.
- Bracht, U.; Schäfer-Nolte, B. (2013): Referenzmodell zur Vertragsfertigung bei Automobilherstellern. Grundlagen, Wertschöpfungsstufen und Herausforderungen des Kooperationstypus Vertragsfertigung. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (4), S. 324–330.
- Bracht, U.; Sontag, T. (2013): Smarte Fabrikplanung - Digital Factory goes mobile. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (4), S. 356–362.
- Bracht, U.; Sydow, A. (2016): Optimierung von Behältermanagement-Prozessen mithilfe vernetzter Technologien. In: *Jahrbuch Logistik*, S. 80–84.
- Bracht, Uwe (1984): Rechnergestützte Fabrikanalyse und -planung auf der Basis einer flächenbezogenen Werksstruktur-Datenbank. Berichte aus dem Institut für Fabrikanlagen, Dissertation an der Universität Hannover: VDI-Verlag (Fortschritt-Bericht Reihe 2 "Betriebstechnik", Nr. 76).
- Bracht, Uwe (2001): Mit Virtual Reality Fabrikplanung erlebbar machen. In: Tagungsband zur ASIM 2001, 15. Symposium Simulationstechnik. Paderborn, 11. - 14.09.2001.
- Bracht, Uwe (2002a): Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik. In: Schulze, T., Schlechtweg, S. u. Hinz, V. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2002 Proceedings der Tagung "Simulation und Visualisierung 2002" Otto-von-

- Guericke-Universität Magdeburg am 28. Februar und 1. März 2001. Ghent, Belgium: SCS-Euroe BVBA, S. 1-12.
- Bracht, Uwe (2002b): Die Digitale Fabrik – Von der Vision zum Integrator des Produkt- /Prozess-Engineerings. In: Digitale Fabrik Automotive. In: Digitale Fabrik Automotive. Berlin, 9. und 10.12.2002.
- Bracht, Uwe (2008): The Digital Factory in Germany. In: BE Conference - Sustainable Infrastructure. 28.-30. Mai, Baltimore, MD USA.
- Bracht, Uwe; Abel, Andreas (2002): Remoteplanner - mit Virtual Reality und Internet zur vernetzten und interaktiven Fabrik- und Anlagenplanung. Deutsches-REFA-Industrial-Engineering-Jahrbuch 2002. Heidelberg: REFA-Verlag.
- Bracht, Uwe; Bierwirth, Thomas (2003): Virtuelle Logistikplanung - Methoden und Modelle zur Abbildung und Bewertung logistischer Prozesse im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (5), S. 219–223.
- Bracht, Uwe; Brunner, Thomas; Oeltjenbruns, Henning (2004): Ganzheitliches prozessorientiertes Projektmanagement. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (3), 96-102.
- Bracht, Uwe; Enge, Daniel; Füller, Karl-Heinz (2007a): Modellierung und Bewertung neuer Prozessketten beim Walzprofilieren. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (3), S. 104–110.
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Motschmann, Tino (2008a): Projektsimulation als Instrument zur änderungsrobusten Konfiguration von Planungsprojekten. In: *projektManagement* (4), 19-27.
- Bracht, Uwe; Gorke, T.; Spies, J. (2015b): Vernetzung eines virtuellen Projekttraums mit dem Fabrik-DMU der Fabrikstrukturplanung. In: *ZWF* 110, S. 639–642.
- Bracht, Uwe; Hagemann, Matthias (1998): Die ganze Fabrik im Simulationsmodell. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 93 (7/8), S. 345–348.
- Bracht, Uwe; Kurz, Oliver (2004): Virtuelle Prozessabsicherung für das Fügeverfahren Kleben - Einsatz von Finite Element Methoden im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (10), 544–549.
- Bracht, Uwe; Kurz, Oliver (2005): Virtuelle Prozessabsicherung und -optimierung der Elektrotauchlackierung – Einsatz von Finite-Elemente-Methoden im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 95 (1/2), S. 38–43.
- Bracht, Uwe; Malagimani, Manohar; Filter, Arno (2008b): Prozessintegration und Datenschutz im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (4), S. 211–216.

- Bracht, Uwe; Masurat, Th (2006a): Die Digitale Fabrik - Umsetzungsstand und neue Anwendungsbereiche. In.: Automobil Fachkongress 2006. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. Ludwigshafen, 23. und 24. Mai 2006: Verlag Moderne Industrie.
- Bracht, Uwe; Masurat, Thomas (2002): Die vergessenen Fabriken. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 154–158.
- Bracht, Uwe; Masurat, Thomas (2003): Integration von Virtual Reality und Materialflusssimulation zum Digitalen Prozessmuster. In: *wt Werkstattstechnik online* 93 (4), S. 249–253.
- Bracht, Uwe; Masurat, Thomas (2005): The digital factory between vision and reality. In: *Computers in Industry* 56 (4), S. 325–333.
- Bracht, Uwe; Masurat, Thomas (2006b): Leitfaden zur Umsetzung der Digitalen Fabrik. In: *CADplus* (5), 56–58.
- Bracht, Uwe; Ostermann, Arne (2003): Gesamtsimulation einer Produktionsprozesskette am Beispiel des neuen Roadster SL bei DaimlerChrysler. In: Johann Bayer, Thomas Collisi und Sigrid Wenzel (Hg.): Simulation in der Automobilindustrie. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 181–188.
- Bracht, Uwe; Pauleser, Thomas; Filter, Arno; Böhle, Carsten (2009): Planung und Änderung von Anlagendaten im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (3), 194–199.
- Bracht, Uwe; Reichert, Johannes (2008): Digitale Fabrik – Entwicklungsrichtungen und Anwendungsbereiche. In.: In: 4. Euroforum-Jahrestagung - Digitale Fabrik. Leipzig, 19. und 20. Februar 2008.
- Bracht, Uwe; Roller, Sebastian (2009): Virtuelle Prozessabsicherung in der Automobilindustrie. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (1-2), 16–21.
- Bracht, Uwe; Rooks, Tobias (2008): Virtuelle Logistikplanung für die Montage. In: *Intelligenter produzieren, VDMA Verlag* (2), S. 24–26.
- Bracht, Uwe; Rooks, Tobias; Adrian, Roberto (2008c): Virtuelle Logistikplanung für die Montage im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: M. Rabe (Hg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 439–447.
- Bracht, Uwe; Scheffler, Katy (2008): Methode zur Identifizierung von potentiellen Workflows in der Produktionsplanung eines Automobilherstellers. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (4), S. 255–261.
- Bracht, Uwe; Schlange, Christian (2010): VR-gestützte Struktur- und Layoutplanung auf Grundlage erweiterter virtueller Fabrikmodelle. In: Gert Zülch und Patricia Stock (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. 14. ASIM- Fachtagung, 7. und 8. Oktober. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 85–92.

- Bracht, Uwe; Spillner, Andrea (2009): Die Digitale Fabrik ist Realität. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (7-8), 648-653.
- Bracht, Uwe; Spillner, Andrea; Reichert, Johannes (2008d): Stufenweise Einführung von 3D-CAD-basierter Fabrikplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (1-2), 12-16.
- Bracht, Uwe; Stäblein, Thomas; Schütte, Andreas (2007b): Effiziente Materialbedarfsplanung bei variantenreicher Serienproduktion komplexer Produkte. In: *wt Werkstattstechnik online* 97 (4), S. 284–292.
- Brandt, Olaf (2005): Die Potenziale sind noch nicht ausgeschöpft - Permanente Rückkopplung bei idealer Vernetzung. In: *Intelligenter produzieren* (1), 18-19.
- Broll, Wolfgang (2013): Augmentierte Realität. In: Ralf Dörner, Wolfgang Broll, Paul Grimm und Bernhard Jung (Hg.): Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Berlin: Springer Vieweg (eXamen.press), S. 241–294.
- Brosch, P. (2014): Smarte digitale Layoutplanung. Neue virtuelle und mobile Ansätze für Umplanungen. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 32. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Bruhnke, Karl-Heinz; Wintrup, Christoph; Fischer, Markus (2003): 3D-Laserscanning. Fabrikdigitalisierung im Bestand. In: *Industriebau* 49 (6), S. 56–58.
- Brunner, Thomas (2005): Internationales Projektmanagement am Beispiel von Lkw-Produktprojekten. Ein neues umfassendes Konzept und seine ganzheitliche Anwendung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker (Bd. 11. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- BUILD-It (2009): BUILD-IT Projekt. Online verfügbar unter http://www.cocoon.ethz.ch/research/projects/closed/build-it/project/index_EN, zuletzt geprüft am 13.07.2010.
- Bullinger, Hans-Jörg; ten Hompel, Michael (2007): Internet der Dinge. Berlin, Heidelberg, New York: VDI-Springer.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2005): Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. Ingelheim: SecuMedia Verlags-GmbH.
- Burghardt, Manfred (Hg.) (2013): Einführung in Projektmanagement. Definition, Planung, Kontrolle, Abschluss. Siemens Aktiengesellschaft. 6., überarb. und erw. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/subhamburg/Doc?id=10769002>.

- Burkhard, H.-D. (2003): Software-Agenten. In: G. Görz, C.-R. Rollinger und J. Schneeberger (Hg.): Handbuch der künstlichen Intelligenz. München, Wien: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, S. 943–1020.
- Bussmann, Stefan (1998): Autonome und kooperative Produktionssysteme. In: *it + ti Informationstechnik und Technische Informatik* 40, S. 34–39.
- Busson, A. (2016): BIM in 5 Worten. In: *AUTOCAD & Inventor Magazin* (1), S. 30.
- CENIT (2016): Industrie 4.0 braucht eine neue Generation von 3D-Tools. Online verfügbar unter http://www.fastsuite.com/en_US/2016/05/23/industrie-4-0-braucht-eine-neue-generation-von-3d-tools/, zuletzt geprüft am 10.01.2017.
- Chen, P. (1976): The Entity-Relationship Model – Toward a Unified View of Data. In: *ACM Transactions on Database Systems (TODS)* 1 (1), S. 9–39.
- Claus, Volker; Schwill, Andreas (2006): Duden Informatik A - Z. Fachlexikon für Studium, Ausbildung und Beruf. 4. Auflage. Mannheim [u.a.]: Dudenverlag (Duden).
- Dettmering, Hendrik; Naß, Alexander; Reiter, Robert (2010): Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik für den Mittelstand. In: *ZWF* 105 (5), S. 489–493.
- DIN 32736 (2008): Gebäudemanagement - Leistungen und Begriffe. Berlin: Beuth.
- DIN 66025-1 (1983): Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen – Allgemeines. Berlin: Beuth.
- DIN 66025-2 (1988): Industrielle Automation; Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen – Wegbedingungen und Zusatzfunktionen. Berlin: Beuth.
- DIN 66215-1 (1974): Programmierung numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen; CLDATA, Allgemeiner Aufbau und Satztypen. Berlin: Beuth.
- DIN 66215-2 (1982): Programmierung numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen; CLDATA, Nebenteile des Satztyps 2000. Berlin: Beuth.
- DIN 66261 (1985): Sinnbilder für Struktogramme nach Nassi-Shneiderman. Berlin: Beuth.
- DIN 6763 (1985): Nummerung – Grundbegriffe. Berlin: Beuth.
- DIN 69900 (2009): Projektmanagement- Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe. Berlin: Beuth.
- DIN 69901-1 (2009): Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 1. Grundlagen. Berlin: Beuth.

- DIN 69901-3 (2009): Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3. Methoden. Berlin: Beuth.
- DIN 69901-5 (2009): Projektmanagement Projektmanagementsysteme. Teil 5. Begriffe. Berlin: Beuth.
- DIN EN 62714-1 (2015): Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 1: Architektur und allgemeine Festlegungen. 1. Aufl. Berlin: Beuth.
- DIN EN 82045-1 (2002): Dokumentenmanagement - Teil 1. Prinzipien und Methoden. Berlin: Beuth.
- DIN EN 82045-2 (2005): Dokumentenmanagement - Teil 2. Metadaten und Informationsreferenzmodelle. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 10218-1 (2012): Industrieroboter; Sicherheitanforderungen. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 10303-239 (2012): Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 50001 (2011): Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. 12. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN IEC 60050-351 (2014): Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch; Teil 351. Leittechnik. Berlin: Beuth.
- DIN ISO 10007 (2004): Qualitätsmanagement - Leitfaden für Konfigurationsmanagement. Berlin: Beuth.
- DIN SPEC 16592 (2016): Universelle Schnittstellen für die Automatisierung - OPC UA und AutomationML. 3. Aufl. Berlin: Beuth.
- Dinkelbach, Werner; Kleine, Andreas (1996): Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre. Berlin: Springer.
- Döllner, G.; Kellner, P. (2000): Digital Mock-Up and Rapid Prototyping in Automotive Product Developement. In: *Society for Design and Process Science* 4 (1), 55-66.
- Dombrowski, Uwe; Tiedemann, Hauke (2005): Die richtigen Fabrikplanungswerkzeuge auswählen – Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (3), 136-140.
- Dombrowski, Uwe; Tiedemann, Hauke; Bothe, Tim (2001): Visionen für die Digitale Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (3), 96-100.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert; Scholl, Armin (2015): Einführung in Operations Research. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48216-2>.

- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Mayer, G. (2008): Betriebliche Standortplanung. In: Dieter Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin: VDI Springer, S. 95–109.
- Dörner, Ralf; Broll, Wolfgang; Grimm, Paul; Jung, Bernhard (Hg.) (2013): Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Berlin: Springer Vieweg (eXamen.press). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-28903-3>.
- Dörrer, Thomas (2000): Wissensbasierte Evaluierung zukünftiger Produktionsstrategien. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 1. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Dowidat, Anja (2002): Delmia und Opel verwirklichen die Digitale Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (4), 171-172.
- Drath, R.; Fedai, M. (2004a): CAEX – ein neutrales Datenaustauschformat für Anlagendaten – Teil 1. In: *atp Automatisierungstechnische Praxis* 46 (2), S. 20–27.
- Drath, R.; Fedai, M. (2004b): CAEX – ein neutrales Datenaustauschformat für Anlagendaten – Teil 2. In: *atp Automatisierungstechnische Praxis* 46 (3), S. 52–56.
- Dreistern Maschinenbau GmbH & Co KG (2004): Rollprofilieren von Hohlkörpern mit variablen Querschnitten. In: *Blech Rohre Profile* (2).
- Eckert, Clemens (2006): Weiterentwicklung und Nutzung von VR-gestützten Fabrikplanungswerkzeugen für KMU. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 16. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Eckert, Clemens; Masurat, Thomas (2005): Die Evolution der Digitalen Fabrik – Visionen eines ganzheitlichen Konzeptes für Industrie und Lehre. In: *lernen & lehren* 20 (77), 10-17.
- Egger, M.; Hausknecht, K.; Liebich, T.; Przybylo, J. (2013): BIM-Leitfaden für Deutschland, Endbericht Forschungsprogramm Zukunft Bau. Aktenzeichen: 10.08.17.7-12.08. Forschungsprogramm. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald (2013): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446436275>.

- Eigner, Martin; Stelzer, Ralph (2009): Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Eisenhart Rothe, Maximilian von (2002): Konzeption und Einführung eines IT-gestützten Produkt-Konfigurationsmanagements für die technische Information in der Automobilentwicklung und -herstellung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 7. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Eißrich, Rainer (2005): Die vernetzte und integrierte Planung durch die Digitale Fabrik - Herausforderungen in der Produktionsplanung. In: *Intelligenter produzieren* (1), S. 4–6.
- Eißrich, Rainer (2007): Digitale Fabrik – Die integrierte und ganzheitliche Ge-werkeplanung. In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Encarnaçao, J.; Stricker, D. (2008): Augmented Reality für industrielle Anwen-dungen in Entwicklung, Produktion und Service am Beispiel des Leitpro-jekts ARVIKA. In: Bernd Reuse und Roland Vollmar (Hg.): Informatikfor-schung in Deutschland. Berlin [u.a.]: Springer, S. 269–282.
- Enge, Daniel (2007): Entwicklung einer Gesamtmethodik zur virtuellen Planung und Bewertung von Prozessketten am Beispiel des Walzprofilierverfahrens. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 17. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Engel, Mathias; Riegermann, Tobias; Schäfer, Achim; Günther, Ulrich (2010): Zehn Jahre Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. In: *Zeitschrift für wirt-schaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (3), S. 178–183.
- Faber, H.; Bracht, U. (1988): CAD-gestützte Fabrikplanung. In: *wt Werkstatts-technik* (7-8), S. 319–323.
- Fahlbusch, Martin (2001): Einführung und erste Einsätze von Virtual Reality-Systemen in der Fabrikplanung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 4. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Fahrmeir, Ludwig; Heumann, Christian; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard (2016): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 8., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch). Onli-ne verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-50372-0>.
- Fecht, N. (2015): Die vierte Revolution. In: *Bild der Wissenschaft* (7), S. 89.
- Fedrowitz, Christian H. (2007): Lieferantenintegration intensivieren - Globale Partnernetzwerke sichern Planung, Inbetriebnahme und Anlauf von Rohbau-

- anlagen. In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Filter, Arno (2009): Prozessintegration und Datensicherheit im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 21. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Finkenzeller, Klaus (2015): RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Fleisch, E. (2005): Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: E. Fleisch und F. Mattern (Hg.): Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–37.
- Fleischer, Jürgen; Wawerla, Marc; Ender, Thomas; Nyhuis, Peter; Heins, Michael; Großhennig, Patrick (2005): Digitaler Serienanlauf beschleunigt den Markteintritt. In: *Intelligenter produzieren* (1), 36-37.
- Forster, Ernst (2007): Digitale Fabrik – Integration der Geschäftspartner. In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Fraunhofer (2016): Fraunhofer IOSB GERTICO Verteilte Simulation. Online verfügbar unter <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/18067/>, zuletzt geprüft am 08.12.2016.
- Freytag, J.-C. (2014): Grundlagen und Visionen großer Forschungsfragen im Bereich Big Data. In: *Informatik Spektrum* 37 (2), S. 97–104. Online verfügbar unter S.
- Furmans, K. (2008): Bedientheoretische Modellierung logistischer Systeme. In: Dieter Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage. 3. Auflage. Berlin: VDI Springer, S. 57–73.
- Gausemeier, Jürgen; Stollt, Guido (2006): Eine Systematik zur Gestaltung der Produktion von morgen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* Heft 101 (1-2), 28-34.
- Geckler, Dieter (2002): Änderungsschleifen in Fahrzeugprojekten. Simulation, Projektmanagement, Prozessgestaltung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 9. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Geckler, Dieter (2008): Konzernweite Einführung der Werkzeuge und Methoden der Digitalen Fabrik in der Volkswagen AG. In: In: 4. Euroforum-Jahrestagung - Digitale Fabrik. Leipzig, 19. und 20. Februar 2008.

- Geckler, Dieter (2015): Energieeffizienz bei der Nutzung von Robotern. München (Kongressunterlagen: Die Energieeffiziente Fabrik), 2015.
- Geckler, Dieter; Fliege, H.; Nagel, J.; Becker, Thorsten; Bracht, U.; Seewaldt, M.; Wolff, D. (2017): Der Energiebedarf der Automobilproduktion im Fokus der Simulation. In: G. Mayer, S. Speckermann, S. Wenzel und C. Pöge (Hg.): Ablaufsimulation der Automobilindustrie: Springer Verlag.
- Geckler, Dieter; Rehnelt, Claudia (2004): Die "Digitale Fabrik" als Wissensdreh-scheibe zwischen OEM und Zulieferer. In: *projektManagement* (1), 26-30.
- Gessler, Michael (Hg.) (2014): Kompetenzbasiertes Projektmanagement (PM 3). Handbuch für die Projektarbeit, Qualifizierung und Zertifizierung auf Basis der IPMA Competence Baseline Version 3.0. Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement. 6., [verb.] Aufl. Nürnberg: GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement.
- Göriz, Steffen (2003): Eine generische Software-Architektur für Multi-Agentensysteme und ihr Einsatz am Beispiel von Fahrerassistenzsystemen. Aachen: Shaker (Berichte aus der Informatik).
- Graesser, Art; Franklin, Stan (1996): Is it an Agent, or just a Program? In: Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages. University of Memphis: Springer.
- Graf, F.; Baller, R. (2016): Die Automobilindustrie als Vorbild. In: *Logistik für Unternehmen* (1/2), S. 57.
- Grundig, Claus-Gerold (2015): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser.
- Gudehus, Timm (2011): Logistik. Grundlagen - Strategien - Anwendungen. 4., aktualisierte Aufl 2010. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-89389-9>.
- Gül, B. (2015): Smarte Fabrik der Zukunft. In: *Productonic* (11), S. 16.
- Günthner, W. A.; Kadachi, M. (2001): Simulationsgestützte Planung und Nutzung von Getränke-Abfüllanlagen: Technische Universität München (Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik).
- Hackenberg, W. (2011): Integrierter Monitoringansatz für die operative CKD-Logistik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovations der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 25 (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Hackstein, R. (1989): Produktionsplanung und -steuerung. 2. Auflage. Düsseldorf: VDI.
- Hahn, A. (2005): Integration verteilter Produktmodelle durch Semantic-Web-Technologien. In: *Wirtschaftsinformatik* 47 (4), S. 278–284.

- Halm, A. (2015): Fabriken schneller und kostengünstiger planen. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 102.
- Hansmann, Karl-Werner; Ringle, Christian Marc (2005): Erfolgsmessung und Erfolgswirkung Virtueller Unternehmungen. In: *Zeitschrift Führung + Organisation* 74 (1), 11-17.
- Hanßen, D.; Riegler, T. (2002): Roland Berger Studie. Vortrag anlässlich eines Pressegespräches. Leinfelden, 02.07.2002.
- Hartmann, Jörg (2007): Die digitale Fabrik. Ganzheitlicher Einsatz von Methoden der „Digitalen Fabrik“ im Schiffbau. In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Hartung, Joachim; Elpelt, Bärbel; Klösener, Karl-Heinz (2009): Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; [mit zahlreichen durchgerechneten Beispielen]. 15., überarb. und wesentlich erw. Aufl. München: Oldenbourg. Online verfügbar unter <http://www.oldenbourg-link.com/isbn/9783486710540>.
- Hasenkamp, Ulrich; Kirn, S.; Syring, M. (1994): CSCW – Computer Supported Cooperative Work. Informationssysteme für dezentralisierte Unternehmensstrukturen. Bonn, Paris: Addison-Wesley.
- Hauser, Siegfried (2004): Grundlagen. In: Werner Voß und G. Buttler (Hg.): Taschenbuch der Statistik. 2. Auflage. München [u.a.]: Fachbuchverlag Leipzig.
- Hausknecht, L.; Liebich, T. (2016): BIM-Kompendium. Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Heinrich, S.; Mayer, G. (2006): Ablaufsimulation im VDA – Ein Bericht aus der Arbeitsgruppe. In: S. Wenzel (Hg.). 12. ASIM-Fachtagung - Simulation in Produktion und Logistik. San Diego, Erlangen: SCS Publishing House, S. 423–428.
- Helbing, Kurt (2010): Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Herold, Helmut; Lurz, Bruno; Wohlrab, Jürgen (2012): Grundlagen der Informatik. 2., aktualisierte Aufl. München: Pearson (Always learning). Online verfügbar unter <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=505942>.
- Hess, A.; Humm, B.; Voß, M. (2006): Regeln für serviceorientierte Architekturen hoher Qualität. In: *Informatik Spektrum* 29 (6), S. 395–411.
- Hinrichs-Stark, Wilko Frederik (2016): Smarte, vernetzte Kollaboration - Ein neuer Ansatz zur ortsungebundenen Zusammenarbeit in logistischen Lieferketten. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 35. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).

- Holtze, P. (2000): Data Mining in der Bedarfsprognose von Komponenten und Teilen. Neue Ansätze zur Planung einer variantenreichen Serienfertigung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Br. 2. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Hopcroft, John E.; Motwani, Rajeev; Ullman, Jeffrey D. (2006): Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. 3. Auflage. Amsterdam: Addison Wesley.
- Horn, Volker (2005a): Die neue Fabrik entsteht wie ein Puzzle. Aus der Vielzahl von Werkzeugen und Methoden zusammengesetzt / Anforderungen aus der Sicht des Maschinenbaus. In: *Intelligenter produzieren* (1), S. 20–22.
- Horn, Volker (2005b): Forderungen an Anlagenlieferanten durch die Digitale Fabrik. In: Sabine Bierschenk und Tom-David Graupner (Hg.): Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 28. und 29. Juni 2005. Ludwigsburg: Verlag Moderne Industrie.
- Hornung, V.; Laakmann, J.; Heiderich, T.; Much, D.; Schotten, M. (1995): Achener PPS-Modell. Sonderdruck des Forschungsinstitutes für Rationalisierung an der RWTH Aachen. 2. Auflage. Aachen: Eigendruck.
- Huber, Walter (2016): Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch: Springer Vieweg Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-12732-9>.
- IEC 62424 (2016): IEC 62424 - Ed. 1.0. Representation of process control engineering – Requests in P&I diagrams and data exchange between P&ID tools and PCE-CAE tools. IEEE 1516 (2010): Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)-Framework and Rules.
- IEC 62541 (div.): OPC Unified Architecture.
- IEEE 1516 (2010): Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)-Framework and Rules.
- IfM Bonn (2010): KMU-Definition des IfM Bonn. Online verfügbar unter <http://www.ifm-bonn.org/index.php?id=89>, zuletzt geprüft am 10.01.2017.
- ISO 16739 (2013): Industry Foundation Classes (IFC) for Date Sharing in the Construction and Facility Management Industrie.
- ISO/IEC 14772-2 (2004): Informationstechnik – Computergrafik und Bildverarbeitung – Modellierungssprache für Virtual Reality (VRML) – Teil 2: Schnittstelle für externes Editieren (EAI). Berlin: Beuth.
- ISO/IEC 19776-2 (2015): Informationstechnik – Computergrafik und Bildverarbeitung – Erweiterbare 3D (X3D) Codierungen – Teil 2. Klassische VRML-Codierung. Berlin: Beuth.

- ISO/PAS 17506 (2012): Industrial automation systems and integration - COLLADA digital asset schema specification for 3D visualization of industrial data. Berlin: Beuth (ISO/PAS 17506:2012-07).
- Jelitto, C. (2016): Erfolg hat viele Gesichter. In: *AUTOCAD & Inventor Magazin* (1), S. 35.
- Jessen, U.; Rittscher, J.; Scholz, I.; Wenzel, S. (2000): Schichtenmodell für die verteilte Nutzung modellgestützter Verfahren. In: T. Schulze, P. Lorenz und V. Hinz (Hg.). Tagungsband Simulation und Visualisierung. San Diego, Erlangen: SCS, S. 17–30.
- Jodin, Dirk (2007): Automatische Methoden der Datenerhebung. In: Hanne Wolf-Kluthausen und Franz Gremm (Hg.): Jahrbuch Logistik 2007. Korschenbroich: free beratung GmbH, S. 227–231.
- Jodin, Dirk; Mayer, Andreas (2004): Automatisierte Methoden und Systeme der Datenerhebung. Technical Report - Sonderforschungsbereich 559 "Modellierung großer Netze in der Logistik". Dortmund.
- John, K. H.; Tiegelkamp, M. (2009): SPS-Programmierung mit IEC 61131-3. Konzepte und Programmiersprachen, Anforderungen an Programmiersysteme, Entscheidungshilfen. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: VDI-Springer.
- Jünemann, Reinhardt (1989): Materialfluß und Logistik - Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Berlin: Springer.
- Junge, Mark (2007): Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: kassel university press.
- Kappler, J.; Schütte, A.; Jung, H.; Arnhold, D.; Bracht, U. (2010): Robuste Primär- und Sekundärbedarfsplanung komplexer und variantenreicher Serienprodukte. In: G. Zülch und P. Stock (Hg.). Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 69–76.
- Karhu, O.; Kansi, P.; Kuorinka, I. (1977): Correcting Working Postures in Industry. A Practical Method for Analysis. In: *Applied Ergonomics* 8 (4), S. 199–201.
- Keil, Heinz-Simon; Arbogast, Peter; Selke, Carsten; Beitingen, Gunter (2006): Ansätze zur Digitalen Fabrik bei Siemens. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101 (1-2), 24–27.
- Keller, G.; Nüttgens, M.; Scheer, A. W. (1992): Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage "Ereignisgesteuerter Prozeßketten (EPK)". In: *Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik (IWI)* 89.
- Keller, W. (2002): Enterprise Application Integration: dpunkt Verlag.
- Kerkenberg, Th. (2016): Digitale Fabrikplanung für zukunftssichere und Industrie 4.0-fähige Produktionssysteme. In: *ZWF* 111 (3), S. 104–108.

- Kersten, W.; Kern, E.-M.; Held, T. (2003): Auf dem Weg zur E-Collaboration. Entwicklungslinien im Electronic Business. In: W. Kersten (Hg.): E-Collaboration: Prozessoptimierung in der Wertschöpfungskette. Wiesbaden: DUV, S. 3–27.
- Kettner, Hans; Schmidt, Jürgen; Greim, Hans-Robert (1984): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München [u.a.]: Hanser.
- Kettner, Hans; Schmidt, Jürgen; Greim, Hans-Robert (2010): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Mit zahlreichen Checklisten. Unveränd. Nachdr. der Ausg. 1984. München: Hanser.
- Klein, C. (2016): Wo sind die Updates zur Smart Factory? In: *Automobilproduktion* (02), S. 48.
- Klippert, Jürgen; Fritzsche, Lars; Gudehus, Thomas; Zick, Jürgen (2007): Präventive computerunterstützte Ergonomieanalyse unter Berücksichtigung physischer und psychosozialer Faktoren. In: Peter Bärenz, Anna-Maria Metz und H.-J. Rothe (Hg.): Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit – Arbeitsschutz, Gesundheit und Wirtschaftlichkeit. Kröning: Asanger Verlag, S. 61–64.
- Klippert, Jürgen; Fritzsche, Lars; Gudehus, Thomas; Zick, Jürgen; Steck, Sybille; Ehler, Ralph et al. (2008): Motion Capturing for Preventive Ergonomic Assessment – Possibilities and Challenges for Practical Application. In: GfA. Dortmund (Hg.). Produkt- und Produktions-Ergonomie – Aufgabe für Entwickler und Planer: Bericht zum 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund, 9.–11. April 2008. 2008. Aufl.: GfA-Press, S. 891–894.
- Knau, Jan (2008): Digitale Fabrik im BMW Werk Leipzig. In: In: 4. Euroforum-Jahrestagung - Digitale Fabrik. Leipzig, 19. und 20. Februar 2008.
- Kobylka, Andrea; Kurtzke, Torsten (2015): Rechnet sich die virtuelle Fabrik. In: *Digital Engineering Magazin* (5), S. 31.
- König, Alexander (2013): Entwicklung eines digitalen Fabrikgesamtmodells und dessen Integration in die Fabrikstrukturplanung eines Automobilherstellers. Digitales Fabrikgesamtmodell für die Fabrikstrukturplanung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 30. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Kossmann, D.; Leymann, F. (2004): Web Services. In: *Informatik Spektrum* 27 (2), S. 117–128.
- Köth, Claus-Peter; Günnel, T. (2016): Audi eröffnet Q5-Werk in Mexiko. Online verfügbar unter <http://www.automobil-industrie.vogel.de/audi-eroeffnet-q5-werk-in-mexiko-a-553010/>, zuletzt geprüft am 16.12.2016.
- Kovács, Nikolaus; Bienert, Renke; Oehlmann, Heinrich (2012): RFID-Standardisierung im Überblick. 1. Aufl. s.l.: Beuth Verlag GmbH (Beuth

- Praxis). Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2032957>.
- Krallmann, H.; Schönherr, M. (2008): Nachhaltige Flexibilisierung von Unternehmen durch das Management Service-orientierter Architekturen als Instrument der Beschäftigungssicherung. In: G. Zülch (Hg.): Beiträge der Arbeits- und Betriebsorganisation zur Beschäftigungssicherung: Gabler Edition Wissenschaft, Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB), S. 101–127.
- Krechmer, K. (2006): The Meaning of Open Standards. In: *The International Journal of IT Standards and Standardization Research*. Universität Aachen 4 (1. Januar - Juni 2006).
- Kromrey, Helmut; Strübing, Jörg (2009): Empirische Sozialforschung. Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung. 12., überarb. und erg. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius (UTB Soziologie, 1040). Online verfügbar unter <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838510408>.
- Krug, W.; März, L. (2010): Kopplung von Simulation und Optimierung. In: L. März, W. Krug, O. Rose und G. Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Heidelberg: Springer, S. 41–45.
- Kuhn, A.; Wenzel, S. (2004): Digitale Logistik. (R)evolutionäre Veränderungen in Planung und Betrieb? In: H. Wolf-Kluthausen (Hg.): Logistik Jahrbuch, S. 60–63.
- Kuhn, Axel (1995): Prozeßketten in der Logistik – Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Dortmund: Verlag Praxiswissen.
- Kuhn, Axel; Turgut, Seniz; Toth, Michael (2008): Effektiver Einsatz Elektronischer Kataloge in der Anlagenplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (1/2), S. 71–75.
- Kuhn, Axel; Wenzel, Sigrid (2008): Simulation logistischer Systeme. In: Dieter Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin: VDI Springer, S. 73–94.
- Kühn, C.; Köhler, J. (2015): Industrial engineering versus Industrie 4.0. In: *ZWF* 110 (11), S. 754.
- Kurbel, K. (1992): Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen – Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kurz, Oliver (2006): Virtuelle Fertigungsprozessabsicherung und -optimierung. Einsatzpotentiale numerischer Berechnungsmethoden im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Inno-

- vationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 14. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Lackes, Richard; Siepermann, Markus (2017): Web 2.0. Hg. v. Wirtschaftslexikon Gabler. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/web-2-0.html>, zuletzt geprüft am 17.01.2017.
- Law, Averill M. (2015): Simulation modeling and analysis. 5. ed. New York NY: McGraw Hill Education.
- Lemmer, K.; Meyer zu Hörste, M.; Suikart, R. (2001): Agentenbasierte Fahrzeugsteuerungs- und -föhrungskonzept. Düsseldorf: VDI-Verlag (VDI-Berichte Nr.1653).
- Lenk, B. (2008): Identifikationssysteme. In: Dieter Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin: VDI Springer, S. 815–825.
- Leymann, Frank; Fehling, C. (2017): Cloud-Computing. Hg. v. Wirtschaftslexikon Gabler. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/cloud-computing.html>, zuletzt geprüft am 17.01.2017.
- Lüddecke, M. (2014): Konzeption eines modularen Entscheidungsunterstützungssystems für die Materiallogistik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 33. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Macke, Carsten; Geckler, Dieter (2004): Die Digitale Fabrik bei Volkswagen. In: Engelbert Westkämper (Hg.). Automobil Fachkongress 2004. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 29. und 30. Juni 2004. Landsberg: Verl. Moderne Industrie.
- Mädche, A.; Staab, S.; Studer, R. (2001): Ontologien. In: *Wirtschaftsinformatik* 43 (4), S. 393–395.
- Mantwill, Frank (2007): Wie kann die Produktentwicklung von der Digitalen Fabrik profitieren? In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Marczinski, Götz (2004): Digitale Fabrik – anspruchsvolle Technologien sinnvoll einsetzen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (11), 666-669.
- Marczinski, Götz (2005): Digitale Fabrik – mit dem 4-Stufenmodell zum Erfolg. In: *In: PPS Management* 10 (2), 38-41.
- Marczinski, Götz (2006): Umfrageergebnisse zur Digitalen Fabrik. In: *VDI-Z* 147 (11/12), S. 72–73.

- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hg.) (2010): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Heidelberg: Springer.
- Masurat, Thomas (2006): Neue Organisationsstrukturen für ein integriertes Produkt- und Prozessengineering im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 15. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Mattern, Friedemann; Mehl, Horst (1989): Diskrete Simulation – Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung. In: *Informatik Spektrum* 12 (4), S. 198–210.
- Mayer, G.; Spieckermann, S. (2008): Lebenszyklus von Simulationsmodellen. Anforderungen und Fallbeispiele aus der Automobilindustrie. In: M. Rabe (Hg.). *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. 13. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 61–69.
- Meierlohr, Christian (Hg.) (2003): Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung. München: Herbert Utz Verlag (Forschungsberichte iwb, 182).
- Menges, Raimund (2004): Die Digitale Fabrik. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung. Stuttgart, 31. März und 1. April 2004. Deutsche Fachkonferenz, Fabrikplanung: Verlag Moderne Industrie.
- Menges, Raimund (2005): Bausteine der Digitalen Fabrik. Frühzeitige Produktbeeinflussung und Prozessabsicherung. In: Sabine Bierschenk und Tom-David Graupner (Hg.): *Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie*. Ludwigsburg, 28. und 29. Juni 2005. Ludwigsburg: Verlag Moderne Industrie.
- Mertens, Peter; Bodendorf, Freimut; König, Wolfgang; Picot, Arnold; Schumann, Matthias; Hess, Thomas (2012): Grundzüge der Wirtschaftsinformatik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mertens, Peter; Griese, Joachim; Ehrenberg, Dieter (1998): Virtuelle Unternehmen und Informationsverarbeitung. Berlin [u.a.]: Springer.
- Meyer Werft - Jos. L. Meyer GmbH (2003): Simulationstoolset für die Schiffbauindustrie (Abschlussbericht für das Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie (BMBF) im Rahmenprogramm Blockbau und Vorausrüstung.).
- Milgram, Paul; Takemura, Haruo; Utsumi, Akira; Kishino, Fumio (1994): Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Hari Das (Hg.). *Photonics for Industrial Applications*. Boston, MA, Monday 31 October: SPIE (SPIE Proceedings), S. 282–292.

- Mohr, Bernd (1992): Ereignisbasierte Rechneranalysesysteme zur Bewertung paralleler und verteilter Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10 Informatik/Kommunikationstechnik, 221).
- Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas; Jörg, Strauch (2013): Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas; Strauch, Jörg (2017): Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. 2. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer.
- Murch, Richard; Johnson, Tony (1999): Intelligent Software Agents. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR.
- N. N. (2006): Zukunftsplanung in 3D. Vernetzte Daten für die Digitale Fabrik. In: *Daimler Chrysler Hightech-Report* (2), S. 12–18.
- National Institute of Standards and Technology (2016): Initial Graphics Exchange Specifications. Online verfügbar unter <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/sp958-lide/246-249.pdf>, zuletzt geprüft am 18.01.2017.
- Natis, Y. V. (2003): Service-Oriented Architecture Scenario: Gartner Research ID Number: AV-19-6751.
- Nävy, Jens (2006): Facility Management. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- NBIMS (2013): National Building Information Model Standard Project Committee. Online verfügbar unter <http://www.nationalbimstandard.org/faq.php#faq1>, zuletzt geprüft am 10.01.2017.
- Neumann, K. (1992): Netzplantechnik. In: T. Gal, R. E. Burkard, K. Neumann und D. Ohse (Hg.): Grundlagen des Operations Research. Bd. 2, Bd. 3. 3. Auflage. Berlin: Springer, S. 165–260.
- Nonaka, I.; Takeuchi, H. (1997): Die Organisation des Wissens. Frankfurt, New York: Campus Verlag.
- North, Klaus (2011): Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. 5., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden (Gabler Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-6427-4>.
- Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S. (2009): Wandlungsfähige Produktionssysteme. In: *wt Werkstattstechnik online* 99 (4), S. 205–210.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2003): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Nyhuis, Peter; Wiendahl, Hans-Peter (2012): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer

- (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-92839-3>.
- OASIS (2006): OASIS - Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0 (OASIS Standard, 12. October 2006).
- Oeltjenbruns, Henning (2000): Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas. Analyse, Vorteile und detaillierte Voraussetzungen sowie die Vorgehensweise zur erfolgreichen Einführung am Beispiel eines globalen Automobilkonzerns. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Unter Mitarbeit von U. Bracht. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 3. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- OMG (2004): Object Management Group (OMG). CORBA: Common Object Request Broker Architecture. Core Specification. Version 3.0.3. March 2004.
- OMG (2009): Business Process Modeling Notation (BPMN). Version 1.2. OMG Document Number. formal/2009-01-03. Online verfügbar unter <http://www.omg.org/spec/BPMN/1.2>, zuletzt geprüft am 10.01.2017.
- Ophey, Lothar (2005): Entwicklungsmanagement. Methoden in der Produktentwicklung. Berlin [u.a.]: Springer.
- Oracle (2016): Oracle Technology Network – Java EE documentation. Online verfügbar unter <http://www.oracle.com/technetwork/java/javaee/documentation/index.html>, zuletzt aktualisiert am 08.12.2016.
- Osburg, Bernhard; Patberg, Lothar; Grüneklee, Axel; Floth, Thomas; Grosse-Gehling, Manfred; Hinz, Martin; Mebus, Helmut (2004): New Steel Body - Sicherer und wirtschaftlicher Karosserieleichtbau mit Stahl. In: *ATZ* 106 (3), S. 190–199.
- Ostermann, Arne Daniel (2001): Neue Ansätze zur gesamtheitlichen Fabriksimulation. Modellkonzept und wissensbasierte Abstraktion. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 5. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Pawellek, Günther (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Pawlaczkyk, Dirk (2006): Scalable Multi Agent Based Simulation – Considering Efficient Simulation of Transport Logistics Networks. In: Sigrid Wenzel (Hg.): Simulation in der Produktion und Logistik. 12. ASIM Fachtagung. San Diego, Erlangen: SCS, 479-488.
- Petri, Carl Adam (1962): Kommunikation mit Automaten. Bonn: Universität Bonn.

- Petzelt, D.; Deuse, J. (2008): Using Predetermined Standard Times in Digital Manufacturing for Deriving Operation Times. In: In: 4. Euroforum-Jahrestagung - Digitale Fabrik. Leipzig, 19. und 20. Februar 2008, S. 40–44.
- Pfeifer, Tilo; Schmitt, Robert (Hg.) (2014): Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 1., überarbeitete Auflage. München: Hanser, Carl.
- Pfitzmann, J. (2007): Integratives Kooperationsmodell zwischen Wissenschaft und Industrie zur Verbesserung ganzheitlicher Arbeitssysteme "Uni in die Firma". In: M. Buch, I. Pahls, J. Pfitzmann und E. Schäfer (Hg.): Arbeitsleben – Facetten der Analyse, Gestaltung und Entwicklung. Kassel: university press, S. 226–245.
- Pfluger, Frank (2008): Digitale Prototypen-Absicherung neuer Baureihen in Fertigungsprozessen durch Prozess-Simulation. In: In: 4. Euroforum-Jahrestagung - Digitale Fabrik. Leipzig, 19. und 20. Februar 2008.
- Pidd, Michael (2004): Computer Simulation in Management Science. 5. Auflage. Chichester: John Wiley & Sons.
- Poding, T.; Sidorovitch, I. (2001): Künstliche Neuronale Netze. Überblick, Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsprobleme. In: H. Hippner, U. Küsters, M. Meyer und K. Wilde (Hg.): Handbuch Data Mining im Marketing: Knowledge Discovery in Marketing Databases, Bd. 1. 1. Auflage. Braunschweig: Vieweg, S. 363–402.
- Poser (2016): mysmithmicro. Online verfügbar unter <http://my.smithmicro.com/win/graphics.html>, zuletzt geprüft am 08.12.2016.
- Probst, Gilbert; Raub, Steffen; Romhardt, Kai (2012): Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-4563-1>.
- Puppe, F. (1991): Einführung in Expertensysteme. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Quasdorff, O. (2016): Die Lean Factory unter Berücksichtigung der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 36. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: VDI Springer.
- Rauterberg, M.; Fjeld, M.; Krueger, H.; Bichsel, M.; Leonhardt, U.; Meier, M. (1997): BUILD-IT. A Computer Vision-based Interaction Technique for a Planning Tool. In: H. Thimbleby, B. O'Conaill und P. Thomas (Hg.). People and Computers XII: Proceedings of HCI'97. London: Springer, S. 303–314.
- REFA (1997): REFA. Methodenlehre der Betriebsorganisation, Datenermittlung, Bd. 2: Fachbuchverlag Leipzig.

- Reichert, Johannes (2010): Methodik zur Verbesserung der Ergebnisqualität bei der IT-gestützten Fabrikplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2009. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 22. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Reinhart, G.; Bauernhansl, T. (2015): Industrie 4.0. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 78.
- Reinhart, Gunther; Berlak, Joachim; Selke, Carsten (2002): Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. In: *ZWF* 97 (1/2), S. 18–23.
- Reinhart, Gunther; Grundwald, S.; Rick, F. (1999): Virtuelle Produktion. Virtuelle Produkte im Rechner produzieren. In: *VDI-Z* 141 (12), 26-29.
- Reinhart, Gunther; Schack, Rainer; Ferstl, Hermann (2008): Organisationsanpassungen – von der Digitalen Fabrik zum Digitalen Unternehmensnetzwerk. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (1/2), S. 17–22.
- Reisig, Wolfgang (1986): Petrinetze. Eine Einführung. 2. Auflage. Berlin: Springer.
- Reiter, B. E. (2004a): Wandel der IT. Mehr als 20 Jahre Freie Software. In: *HMD* Heft 238, August 2004, S. 83–91.
- Reiter, Robert (2004b): Digitale Fabrik - Erfahrungen aus dem produktiven Einsatz virtueller Methoden. In: Engelbert Westkämper (Hg.). Automobil Fachkongress 2004. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 29. und 30. Juni 2004. Landsberg: Verl. Moderne Industrie.
- Richter, J.-P.; Haller, H.; Schrey, P. (2005): Serviceorientierte Architektur. In: *Informatik Spektrum* 28 (5), S. 413–416.
- Riegmann, Tobias; Bürkner, Stephan; Günther, Ulrich (2011): Referenzprozesse zur effektiven Implementierung der Digitalen Fabrik. Vier Stufen Ansatz mit flexibel einsetzbaren Implementierungsinstrumenten. In: *ZWF* 106 (3), S. 122–126.
- Robinson, Stewart (2004): Simulation. The Practice of Model Development and Use. Chichester: Wiley.
- Roidl, M.; Follert, G. (2007): Simulation von multiagentenbasierten Materialflussteuerungen. In: R. Koschke, O. Herzog, K.-H. Rödiger und M. Ronthaler (Hg.): Informatik 2007 – Informatik trifft Logistik, Proceedings, Lecture Notes in Informatics. Bonn: Köllen Druck + Verlag GmbH, S. 405–412.
- Roller, Sebastian (2012): Integrierte Lackierprozess-Simulation an virtuellen Fahrzeugprototypen in der digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 27. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).

- Rooks, Tobias (2009): Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 20. (Hrsg.); Prof. U. Bracht).
- Rother, Mike; Shook, John (2000): Sehen Lernen – mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendungen beseitigen. Dt. Ausg., 1.0. Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH.
- Runde, Christoph (2009): Erfolgsfaktoren für den Einsatz von Visualisierungstechniken in kleinen und mittleren Unternehmen. Virtual Dimension Center (VDC), Fellbach.
- Sandmaier, Hermann; Sägebarth, Joachim; Boufercha, Nourdin; Schäfer, Wolfgang; Othmann, Nabih; Schlenker, Dirk; Burgard, Matthias (2008): Neues Verfahren zur Montage von Mikro-Komponenten. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (3), S. 200–203.
- SASIG (2009a): ECM Recommendation Part 1 (ECR), Version 2.0, Issued Aug. 2009, VDA 4965 – Part 1 Version 3.0, issued Jan. 2010.
- SASIG (2009b): White Paper - Engineering Change Management Reference Process covering ECM Recommendation, Version 2.0, issued Aug. 2009, covering VDA 4965 V3.0 Version 3.0, issued Jan. 2010.
- Sauer, Olaf (2002): Nutzungsneutralität als Planungsbasis einer Fabrik - Grenzübergreifende Planung, Realisierung und Projektmanagement. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 173–175.
- Sauer, Olaf (2011): Informationstechnik in der Fabrik der Zukunft: Fabrik 4.0. In: *ZWF* 106 (12), S. 959–960.
- Sauer, Olaf; Schleipen, M.; Ackermann, Ch. (2010): Digitaler Fabrikbetrieb. In: Gert Zülch und Patricia Stock (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. 14. ASIM- Fachtagung, 7. und 8. Oktober. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 559–566.
- Schack, Rainer (2008): Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. München: Herbert Utz Verlag (IWB Forschungsberichte, Band 207).
- Schäfer, Karina (2008): Der nächste Schritt - von der digitalen Anlage zur Virtuellen Inbetriebnahme. In: *Digital Engineering Magazin* (6), S. 31–33.
- Schäfer, Michael (1999): Numerik im Maschinenbau. Berlin: Springer.
- Schäfer-Nolte, B. (2015): Referenzmodell für Informationsprozesse in Vertragsfertigungsprojekten bei der Automobilherstellung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 34. (Hrsg.); Prof. U. Bracht).

- Scheer, August-Wilhelm (1990): CIM - Der computergesteuerte Industriebetrieb. Berlin [u.a.]: Springer.
- Scheffler, Katy (2009): Unterstützung des Planungsprozesses mit Hilfe von Workflowlösungen am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 19. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2014. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05459-4>.
- Scherer, Sandra; Wabner, Markus; Neugebauer, Reimund; Weidlich, Dieter (2008): VR/AR-Visualisierung von FEM-Daten – FEM-Eigenschaftsanalyse von Werkzeugmaschinen unter Nutzung immersiver Visualisierungsumgebungen. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (6), 504-509.
- Schiehlen, Werner; Eberhard, Peter (2004): Technische Dynamik. Modelle für Regelung und Simulation. 2. Auflage. Stuttgart: Teubner.
- Schlange, Christian (2010): Integrierte Struktur- und Layoutplanung unter Nutzung erweiterter virtueller Fabrikmodelle. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 23. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Schlögl, Wolfgang (2007): Die Digitale Fabrik im Umbruch – Von der Planungs-umgebung zur Life-Cycle-Plattform. In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Schlott, Stefan (2006): Wegbereiter der Automatisierung. In: *Automobil-Produktion* (8), 28-29.
- Schmidgalla, Hans (1995): Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. 1. Auflage. München [u.a.]: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).
- Schmitz, Roland; Burmester, Michael (2007): Kompendium Medieninformatik. Medienpraxis. 1. Auflage. Berlin: Springer (X.media.press).
- Schmückle, Rainer E. (2010): In der Ferne liegt das Ziel. In: *Automobil-Produktion* 1 (2), S. 30–31.
- Schneider, Markus; Ettl, Michael (2012): Lean Factory Design. Ganzheitliche Fabrikgestaltung und -betrieb nach Lean-Kriterien. In: *ZWF* 107 (1-2), S. 61–66.
- Schoch, Andreas (2008): Unterstützung des Product-Ramp-Up durch die Digitale Fabrik – Erfahrungsbericht ThyssenKrupp Drauz Nothelfer. In: In: 4. Euroforum-Jahrestagung - Digitale Fabrik. Leipzig, 19. und 20. Februar 2008.

- Scholl, A. (2008a): Grundlagen der modellgestützten Planung. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: VDI Springer, S. 35–42.
- Scholl, A. (2008b): Optimierungsansätze zur Planung logistischer Systeme und Prozesse. In: D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hg.): Handbuch Logistik, Bd. 3. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: VDI Springer, S. 43–57.
- Schönheit, Martin; Däumler, M.; Prinz, F. (2000): Die Fabrik, ein lebender Organismus – Fabrikplanung aus einer Hand. In: *wt Werkstattstechnik* 90 (3), 89–91.
- Schreiber, Werner; Zimmermann, Peter (2012): Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt : Technologien und Anwendungen : mit CD-ROM. Heidelberg: Springer.
- Schuh, G.; Brandenburg, U.; Cuber, S. (2012): Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Aufgaben. In: Günther Schuh und Volker Stich (Hg.): Grundlagen der PPS. 4., überarb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch, / Günther Schuh; Volker Stich, Hrsg. ; 1), 29–81.
- Schuh, Günther; Gottschalk, Sebastian; Nöcker, Jan; Wesch-Potente, Cathrin (2008): Flexible Vernetzung statt starrer Integration – die Zukunft der digitalen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (3), S. 127–131.
- Schuh, Günther; Wesch, Cathrin; Koch, Sven; Gulden, Alexander; Gottschalk, Sebastian (2007): Objektorientierte Fabrikplanung Teil 1. Modellierung modularer Produktionsstrukturen. In: *wt Werkstattstechnik online* 97 (3), S. 166–169.
- Schulte-Zurhausen, Manfred (2014): Organisation. 6. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). Online verfügbar unter <http://elibrary.vahlen.de/index.php?dokid=224>.
- Schulz, Robert (2007): Digitale Fabrikplanung im Anlagenbau. In: Automobil Fachkongress. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie; Internationaler Fachkongress. München, 23. und 24. Oktober 2007: Verlag Moderne Industrie.
- Schumann, Heidrun; Müller, Wolfgang (2000): Visualisierung. Grundlagen und allgemeine Methoden. Berlin [u.a.]: Springer.
- Schwarz, Ulrich (2006): Digitale Module. In: *Industriebau* (6), S. 24–29.
- Seewaldt, M.; Nagel, J.; Geckler, Dieter; Bracht, U. (2017): Energy-oriented material flow simulation contribution to automotive industry 4.0. In: Simulation Notes Europe.
- Seitz, Matthias (2015): Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Fabrik- und Prozessautomation. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl

- Hanser Verlag. Online verfügbar unter <http://www.es.hsmannheim.de/sps40/>.
- Shabana, Ahmed A. (2013): Dynamics of multibody systems. Fourth edition. Cambridge: Cambridge University Press. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107337213>.
- Silcher, S.; Groß, E.; Königsberger, J.; Siegert, J.; Lickefett, Michael; Bauernhansl, T.; Mitschang, B. (2015): Mobile Fabriklayoutplanung. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 100.
- Sly, D.; Moorthy, S. (2001): Simulation Data Exchange (SDX) Implementation and Use. In: B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros und M. W. Rohrer (Hg.). Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, S. 1473–1477.
- Software-Cluster (2017). Online verfügbar unter <http://www.software-cluster.org/de/forschung/themen/emergente-software>, zuletzt geprüft am 02.05.2017.
- Sontag, T. (2014): Smarte Fabrikplanung. Mobile Applikationen zur Unterstützung der Fabrikplanung. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 31. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Spath, Dieter; Lentes, Joachim (2008): Digitale Produktion. In: *Industrie-Management* 24 (2), 27-30.
- Spillner, Andrea (2012): Entwicklung, Stand und Perspektiven der Digitalen Fabrik. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 26. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Springer Gabler (Hg.) (2016): Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/cloud-computing.html>, zuletzt geprüft am 10.01.2017.
- Spur, Günter (2001a): Begriffe der Fertigungstechnik sind genormt. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (9), 509.
- Spur, Günter (2001b): Begriffe in der Produktionstechnik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (3), S. 141.
- Spur, Günter (2001c): Ganzheitlicher Ansatz zur virtuellen Produktionsplanung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (1-2), 11-15.
- Spur, Günter (2002): Management der Produktentwicklung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (1-2), S. 69.
- Stäblein, Thomas (2008): Integrierte Planung des Materialbedarfs bei kundenauftragsorientierter Fertigung von komplexen variantenreichen Serienprodukten. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen

- der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 18. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Stachowiak, Herbert (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien [u.a.]: Springer.
- Steinhauer, Dirk (2008): The Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) - 10 Years of Cooperative Development and Interbranch Applications. In: Proceedings of the 10th Euro-Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT). Berlin, S. 453–465.
- Steinhauer, Dirk (2011): Planung komplexer Montageabläufe mit Hilfe der constraintbasierten Simulation. In: M. Rabe (Hg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 81–89.
- Strehlitz, Markus (2015): Digitale Fabrik und Industrie 4.0: Verbindung zweier Welten. In: *Automobil-Produktion* (7), S. 68–71.
- Sydow, A. (2017): Dynamisches Behältermanagement. Konzeption eines IT-gestützten Management- und Entscheidungsunterstützungssystems für automobile Mehrwegbehälterkreisläufe. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 38. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Szulman, P.; Assmann, D.; Doerr, J.; Eisenbarth, M.; Hefke, M.; Soto, M. M.; Trifunovic, A. (2005): Using Ontology-Based Reference Models in Digital Production Engineering Integration. In: Sabine Bierschenk und Tom-David Graupner (Hg.): Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 28. und 29. Juni 2005. Ludwigsburg: Verlag Moderne Industrie.
- ten Hompel, Michael; Büchter, Hubert; Franzke, Ulrich (2008): Identifikationssysteme und Automatisierung. Berlin: Springer (VDI-Buch Intralogistik).
- ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten (2010): Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Teufel, S.; Sauter, C.; Mühlherr, T.; Bauknecht, K. (1995): Computerunterstützung für die Gruppenarbeit. Bonn: Addison-Wesley.
- Toledo Muñoz, María Begoña (2006): Agentenbasierte Modellierung und Analyse von Verbindungen im Produktentstehungsprozess. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 13. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Toledo Muñoz, María Begoña; Spors, Karin; Bracht, Uwe; Schimmmer, Manfred (2005): Agentenbasierte Modellierung und Analyse von Verbindungen im Produktentstehungsprozess. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (6), S. 319–324.

- Ulrich, W. (2002): Wörterbuch Linguistische Grundbegriffe. 5. Auflage. Berlin, Stuttgart: Borntraeger Hirt.
- VDA (2009a): VDA Empfehlung: 3D Datenaustausch in der Fabrikplanung. Erstellt von der AG "Digitale Fabrikplanung" ((Keine Angabe)).
- VDA (2009b): Verband der Automobilindustrie e. V. Der Arbeitskreis Product Lifecycle Management im VDA ((Keine Angabe)).
- VDA 4951 Part 1-3 (2009): VDA-Empfehlung. Datenfernübertragung von CAD/CAM Daten ((Keine Angabe)).
- VDA 4958 (2005-2007): Langzeitarchivierung (LZA) nicht-zeichnungsbasierter, digitaler Produktdaten, Teil 1-4.
- VDA 4960 (1993): VDA-Empfehlung. CAD/CAM-Datenaustausch in der Betriebsstättenplanung (VDABS) ((Keine Angabe)).
- VDA 4963 (2006): Austausch von CAD Daten in der Fabrikplanung. Austausch von 2D Daten mit STEP-CDS ((Keine Angabe)).
- VDC (2012): Virtual Reality Installationen in Deutschland. Virtual Dimension Center (VDC), Fellbach.
- VDC (2016): Zukunftsstudie - Digitales Engineering 2025. Virtual Dimension Center (VDC), Fellbach.
- VDI 2219 (2016): Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung. Einführung u. Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. 9. Aufl. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Konstruktion, Weißdruck).
- VDI 3404 (2009): Generative Fertigungsverfahren – Rapid-Technologien. Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 2: Fertigungsverfahren. Weißdruck).
- VDI 3633 Blatt 1 (2014): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Gründruck).
- VDI 3633 Blatt 11 (2009): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Simulation und Visualisierung. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Weißdruck).
- VDI 3633 Blatt 12 (2016): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Simulation und Optimierung. Entwurf. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Weißdruck).
- VDI 3633 Blatt 2 (1997): Lastenheft/Pflichtenheft und Leistungsbeschreibung für die Simulationsstudie. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Weißdruck).

- VDI 3633 Blatt 3 (1997): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionsystemen - Experimentplanung und -auswertung. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Weißdruck).
- VDI 3805 (div.): Produktdatenaustausch in der Technischen Gebäudeausrüstung. Diverse Richtlinienblätter. VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung. Zugehörige Handbücher: VDI-Handbuch Technische Gebäudeausrüstung, Bd. 1, Bd. 2 und Bd. 4. Berlin: Beuth.
- VDI 4465 (2016): Modellierung und Simulation. Modellbildungsprozess. Gründruck. Berlin: Beuth.
- VDI 4472 (div.): Anforderungen an Transpondersysteme zum Einsatz in der Supply Chain. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 5 und 6, Weißdruck).
- VDI 4499 (2016): Fabrikplanung und -betrieb. Band 2: Modellierung und Simulation. Berlin: Beuth.
- VDI 4499 Blatt 1 (2008): Digitale Fabrik – Grundlagen. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Weißdruck).
- VDI 4499 Blatt 2 (2011): Die Digitale Fabrik – Digitaler Fabrikbetrieb. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Gründruck).
- VDI 4499 Blatt 3 (2016): Die Digitale Fabrik – Datenmanagement und Systemarchitektur. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Gründruck in Bearbeitung).
- VDI 4499 Blatt 4 (2015): Die Digitale Fabrik – Der Mensch in der Digitalen Fabrik. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Bd. 8, Gründruck in Bearbeitung).
- VDI 5200 (2016): Fabrikplanung und -betrieb. Band 2: Modellierung und Simulation - VDI-Richtlinien. Berlin: Beuth.
- VDI 5200 Blatt 1 (2011): Fabrikplanung (Gründruck): Beuth.
- VDI 5600 Blatt 1 (2016): Manufacturing Execution Systems – Fertigungsmanagementsysteme. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Informations-technik, VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 1).
- VDI 5610 Blatt 1 (2009): Wissensmanagement im Engineering. Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Berlin: Beuth (VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 1, VDI-Handbuch Informationstechnik, Bd. 1, VDI-Handbuch Produktentwicklung und Konstruktion).
- VDI 6020 (2016): Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Gründruck. Berlin: Beuth.
- VDI/VDE (2015): Statusreport Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0).

- VDI/VDE (2016): Statusreport: Chancen mit Big Data - Use Cases.
- VDMA/VDA (1994): Industrielle Automation – Rechnerunterstütztes Konstruieren – Festlegung einer Untermenge von IGES. Version 5.1 (VDAIS); Basisgeometrie und Bemaßung, VDMA/VDA 66319-1.
- Vetter, E. (2003): Softwaresimulation von Laserscannern in einer virtuellen 3D-Umgebung: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (2016): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 3. Logistik. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (2017): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Technik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53254-6>.
- Voigt, T. (2004): Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Dissertation. München, T. U., München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt.
- Voss, C. (2004): Darstellung und Optimierung der Anlagenregelung einer Abfüllanlage mit Hilfe einer Computersimulation. Diplomarbeit. Fachhochschule Südwestfalen - Hochschule für Technik und Wirtschaft. Fachbereich Elektrische Energietechnik.
- Vossen, Gottfried (2000): Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbankmanagementsysteme. 4., korrigierte und erg. Aufl. München: Oldenbourg.
- W3C-Konsortium (2016): Extensible Markup Language. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/XML/>, zuletzt geprüft am 08.12.2016.
- Walter, Thomas Jörg (2002): Einsatz von Methoden der digitalen Fabrik bei der Planung von Produktionssystemen für die Automobilindustrie. Dissertation am IMAB der TU Clausthal aus der Reihe: Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 6. (Hrsg.): Prof. U. Bracht).
- Warnecke, Hans-Jürgen; Löhr, Hans-Günter; Kiener, Waldemar (1975): Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung. Mainz: Krausskopf.
- Wavefront (2016): Wavefront OBJ File Format Summary. Online verfügbar unter <http://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>, zuletzt geprüft am 18.01.2017.
- Web3D-Konsortium (2016): Web3DConsortium. All Standards. Online verfügbar unter <http://www.web3d.org/standards/all>, zuletzt geprüft am 08.12.2016.
- Weck, M.; Brecher, C. (2006): Werkzeugmaschinen 4 – Automatisierung von Maschinen und Anlagen. 6. Auflage. Berlin: VDI Springer.
- Wegener, L. (2001): Datenbanken. In: K. Bruns und P. Klimsa (Hg.): Informatik für Ingenieure kompakt. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, S. 99–138.

- Weiss, C. (2016): Von der Vergangenheit in die Zukunft. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (3), S. 100.
- Wenzel, S.; Bernhard, J. (2008): Definition und Modellierung von Systemlasten für die Simulation logistischer Systeme. In: P. Nyhuis (Hg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer, S. 487–509.
- Wenzel, S.; Meyer, R. (1993): Kopplung der Simulation mit Methoden des Datenmanagement. In: A. Kuhn, A. Reinhardt und H.-P. Wiendahl (Hg.): Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. Reihe: Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 7, Band 7. Braunschweig: Vieweg, S. 347–368.
- Wenzel, Sigrid (1998): Verbesserung der Informationsgestaltung in der Simulationstechnik unter Nutzung autonomer Visualisierungs-werkzeuge. Reihe Unternehmenslogistik. Dissertation. Dortmund: Verlag Praxiswissen.
- Wenzel, Sigrid (2004): Die Digitale Fabrik - Ein Konzept für interoperable Modellnutzung. In: *Industrie-Management* 20 (3), S. 54–58.
- Wenzel, Sigrid (2006): Die Digitale Fabrik – Wirtschaftliche Notwendigkeit und wissenschaftliche Faszination. In: Lars Mönch und Jochen Beyer (Hg.): Aspekte der Wirtschaftsinformatik: Methoden, Werkzeuge und Anwendungen. Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Peter Gmilowsky. San Diego, Erlangen: SCS, 205-222.
- Wenzel, Sigrid; Hellmann, A.; Jessen, Ulrich (2003): e-Services – a Part of the „Digital Factory“. In: H. In: Bley (Hg.). (Hrsg.): Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Saarbrücken, S. 199-203.
- Wenzel, Sigrid; Jessen, Ulrich; Bernhard, Jochen (2005): Classifications and Conventions Structure the Handling of Models within the Digital Factory. In: *Computers in Industry* 56 (4), S. 334–346.
- Wenzel, Sigrid; Weiß, Matthias; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin: Springer.
- Westkämper, E. (2011): Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit mit Elementen der Digitalen Fabrik sichern. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (3), S. 98.
- Westkämper, Engelbert; Bierschenk, Sabine; Kuhlmann, Timm (2003): Digitale Fabrik – nur was für die Großen? In: *wt Werkstattstechnik online* 93 (1/2), 22-26.
- Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentes, Joachim (2013): Digitale Produktion. Berlin: Springer Vieweg Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20259-9>.
- Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich; Balve, Patrick; Tilebein, M. (2000): Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen - Ein Bezugsrahmen

- für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. In: *wt Werkstattstechnik* 90 (1/2), S. 22–26.
- WfMC: Workflow Management Coalition. Online verfügbar unter <http://www.wfmc.org/>, zuletzt geprüft am 16.01.2017.
- Wiendahl, H.-P. (2010): Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Auflage. München: Hanser Verlag.
- Wiendahl, Hans-Peter (1996): Grundlagen der Fabrikplanung. In: Walter Eversheim und Günther Schuh (Hg.): Betriebshütte: Produktion und Management (Teil 2), Bd. 7. Berlin [u.a.]: Springer.
- Wiendahl, Hans-Peter (2002a): Auf dem Weg zur "Digitalen Fabrik". In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (4), 121.
- Wiendahl, Hans-Peter (2002b): Wandlungsfähigkeit. (Hrsg.): Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V., 48 Seiten. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 122–127.
- Wiendahl, Hans-Peter; Fiebig, Christian; Heger, Christoph-Lutz; Worbs, Jochen (2002): Freiflug durch die Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (4), S. 139–143.
- Wiendahl, Hans-Peter; Hernández, Roberto (2002): Fabrikplanung im Blickpunkt - Herausforderung Wandlungsfähigkeit. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (2), S. 133–138.
- Wiendahl, Hans-Peter; Nofen, Dirk; Klußmann, Jan Hinrich; Breitenbach, Frank (2014a): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser, Carl.
- Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2014b): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446437029>.
- Wiendahl, Hans-Peter; Reichhardt, Jürgen; Hernández, Roberto (2001): Kooperative Fabrikplanung. In: *wt Werkstattstechnik* 91 (4), S. 186–191.
- Willmann, Christian (2011): Konzeption einer kontextbasierenden Wissensumgebung für die digitale Fabrik. Dissertation an der Universität Kassel aus der Reihe: Produktionsorganisation und Fabrikplanung. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2010. Aachen: Shaker Verlag (Bd. 1. (Hrsg.): Prof. S. Wenzel).
- Wirth, Siegfried; Schenk, Michael; Müller, Egon (2012): Herausforderungen für zukünftige Fabriken. In: *ZWF* 107 (1/2), S. 17.
- Wittlage, Helmut (1993): Methoden und Techniken praktischer Organisationsarbeit. 3. Auflage. Herne, Berlin: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe (NWB-Betriebswirtschaft).

- Wöhre, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit (2016): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München: Verlag Franz Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Womack, James P.; Jones, Daniel T.; Roos, Daniel (1992): Die zweite Revolution in der Autoindustrie. Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology. 7. Aufl. Frankfurt/M. [u.a.]: Campus-Verl.
- Wortmann, Dirk (2001): Traum-Fabriken – Von der Simulationstechnik zur Digitalen Fabrik. S. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (6), 342-344.
- Zäh, Michael F.; Müller, Nils; Aull, Florian; Sudhoff, Wolfgang (2005a): Digitale Planungswerzeuge. In: *wt Werkstattstechnik online* 95 (4), S. 175–180.
- Zäh, Michael F.; Müller, Stefan (2004): Referenzmodelle für die Virtuelle Produktion. In: *Industrie-Management* 20 (1), 52-55.
- Zäh, Michael F.; Schack, Rainer (2006): Methodik zur Skalierung der Digitalen Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101 (1/2), 11-14.
- Zäh, Michael F.; Schack, Rainer; Carnevale, Marco; Müller, Stefan (2005b): Ansatz zur Projektierung der Digitalen Fabrik. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (5), 286-290.
- Zäh, Michael F.; Schack, Rainer; Munzert, Ulrich (2005c): Digitale Fabrik im Gesamtkontext. In: Sabine Bierschenk und Tom-David Graupner (Hg.): Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Ludwigsburg, 28. und 29. Juni 2005. Ludwigsburg: Verlag Moderne Industrie.
- Zangemeister, Christof (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 4. Auflage. München: Wittemann.
- Zell, A. (1994): Simulation neuronaler Netze. Bonn: Addison-Wesley Publishing Company.
- Zhang, P.; Bauer, S.; Sontag, T. M. (2017): Mensch-Roboter-Kooperation in der Digitalen Fabrik. Konzept zur Planung und Absicherung. In: *ZWF* 112 (1-2), S. 73–77.
- Zimmermann, H.-D. (2007): Elektronischer Dokumentenaustausch zwischen Unternehmen. In: R. Wölflé und P. Schubert (Hg.): Business Collaboration. München: Hanser, S. 127–134.
- Zülch, G. (2010a): Modellierung von Personen in Werkzeugen der Digitalen Fabrik. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hg.): Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten (Jahresdokumentation 2010). Dortmund: GfA-Press, S. 19–28.

- Zülch, G. (2010b): Stand und Entwicklungstendenzen der personalorientierten Simulation. In: Gert Zülch und Patricia Stock (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. 14. ASIM- Fachtagung, 7. und 8. Oktober. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 1–19.

Glossar

ABC-Analyse

Die ABC-Analyse bezeichnet ein Analyseverfahren in Form einer Wert-Häufigkeitsverteilung, bei der die Einzelwerte eines Parameters in (meistens) drei Gruppen (A, B, C) eingeteilt werden. Sie wird in der Layoutplanung meist für die Analyse des Produktionsprogramms beispielsweise mit den Parametern Produktionsmenge, Umsatz oder Zeitaufwand je Produkt eingesetzt. Die Ergebnisse der ABC-Analyse werden u. a. für die Bereichsbildung, die räumliche Strukturierung oder die Planungstiefe genutzt.

Ablauforganisation

Laut Wiendahl (2010, S. 16), regelt die Ablauforganisation „den grundlegenden Ablauf der normalen Geschäftsvorfälle, um ein rationelles und einheitliches Vorgehen sicherzustellen.“

Agentensystem

Ein Agentensystem ist ein Softwareprogramm, das aus kooperierenden Agenten besteht, die z. B. Planungs- oder Dispositionsaufgaben gemäß vorgegebenen Optimierungskriterien lösen.

Anlage

Als Anlage wird in diesem Buch eine zusammenhängende Fertigungseinrichtung verstanden, die mehrere Komponenten zur Herstellung eines komplexen Bauteils oder einer Baugruppe umfasst. Diese Komponenten können u.a. Maschinen, Roboter, Fördereinrichtungen oder Steuerungen sein.

Änderungsmanagement

Das Änderungsmanagement beschäftigt sich mit der Durchführung von Änderungen an den Daten eines Produktes, eines Produktionsprozesses oder von Produktionsressourcen. Mit dem Änderungsmanagement muss ein entsprechender Kommunikationsprozess über Änderungen zwischen

den beteiligten Partnern sichergestellt sein. U. a. erfasst und verwaltet das Änderungsmanagement Änderungsanträge und gibt bei Abschluss der Änderung eine Information an die Beteiligten.

Applikation

Eine Applikation bezeichnet ein Anwendungsprogramm, das selbstständig auf einem Computer abläuft.

Aufbauorganisation

„Unter der Aufbauorganisation eines Unternehmens wird die hierarchische Gliederung in sogenannte Organisationseinheiten unterschiedlichen Umfangs verstanden.“ (Wiendahl 2010, S. 16)

Augmented Reality (AR)

Bei der Augmented Reality wird die reale Umgebung des Betrachters mit virtuellen Informationen überlagert, so dass Realität und Virtualität in Echtzeit gleichzeitig wahrgenommen werden (vgl. VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3).

Ausschreibung

Die Ausschreibung bezeichnet eine öffentliche Bekanntgabe eines Bedarfes einschließlich der zugehörigen allgemeinen Leistungsbedingungen. Ausschreibungen sind immer dann sinnvoll, wenn mehrere Anbieter abgefragt werden sollen und bezüglich der zu beschaffenden Leistungen keine festen Marktpreise existieren.

Best-Practice-Lösung

Als Best-Practice-Lösung wird die häufig in einem intensiven Vergleich (Benchmarking) ermittelte und beste Lösung für eine Aufgabe oder einen Prozess bezeichnet.

Bestand

Der Bestand bezeichnet die zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandene Menge an beispielsweise Material, Werkstücken, Baugruppen oder auch Information in einem örtlich bestimmten Teil des Betriebes (Lager, Bereich, Arbeitsplatz).

Betriebsmittel

Betriebsmittel sind zur Durchführung eines Produktionsprozesses notwendig und werden in Ver- und Entsorgungsanlagen, Fertigungsmittel, Mess- und Prüfmittel, Fördermittel, Lagermittel, Organisationsmittel und Innenausstattung gegliedert.

Betriebsstätte

Eine Betriebsstätte ist als feste Geschäftseinrichtung definiert, die der Tätigkeit eines Unternehmens zur Ausübung des Betriebes dient. Als Betriebsstätte gelten auch Bauausführungen und Montagen. Betriebsstätten sind insbesondere der Sitz der Geschäftsleitung, Fabrikationsstätten, Lager, Ein- und Verkaufsstellen sowie sonstige Geschäftsstellen.

Big Data

Unter Big Data werden große Datenmengen verstanden, die beispielsweise über das Internet der Dinge, über Cyber Physical Systems, Social Media, semantische Web-Technologien oder im Kontext von Industrie 4.0 entstehen. Diese zeichnen sich nicht nur durch ihr Volumen (engl. Volume) sondern auch durch unterschiedliche Datenformate (engl. Variety), Aktualität (engl. Velocity) und Glaubwürdigkeit (engl. Veracity) aus (vgl. Freytag 2014, S. 97 ff.).

Building Information Modeling (BIM)

Bezeichnet eine Methode der optimierten Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden mit Hilfe von Software und vernetzten Daten zu einem ganzheitlichen Modell, welches u. a. eine virtuelle 3D-Darstellung, beschreibende Daten, administrative Attribute, Termindaten und finanzielle Daten umfasst (Egger et al. 2013).

Business Re-Engineering

Business Re-Engineering steht für die umfassende Änderung bestehender betrieblicher Abläufe und für die Neugestaltung von Geschäftsprozessen. Die Ziele orientieren sich an den Kunden und den Wettbewerbern.

Cloud Computing

Laut Gabler Lexikon (vgl. Springer Gabler 2016) umfasst das Cloud Computing Technologien und Geschäftsmodelle, mit denen IT-Ressourcen wie Server oder Software – meistens über ein Netz ohne lokale Installation –

zur Verfügung gestellt und ihre Nutzung nach flexiblen Bezahlmodellen abgerechnet werden.

Collaborative (Virtual) Engineering

Beim Collaborative (Virtual) Engineering bezieht sich die Kollaboration auf alle Aufgaben und Prozesse des Engineering sowohl in der Produktentstehung als auch in Produktionsplanung und -betrieb. Das Collaborative (Virtual) Engineering unterstützt durch virtuelle Arbeitsumgebungen und Engineering-Plattformen dezentrale Teams auch unternehmensübergreifend.

Computer Aided Design (CAD)

Computer Aided Design (deutsch: rechnerunterstützte Konstruktion) ist ein Sammelbegriff für alle Aktivitäten, bei denen die EDV direkt oder indirekt im Rahmen von Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten eingesetzt wird.

Im weiteren Sinne: Rechnerunterstützter Entwurf im Rahmen der Planung und Projektierung. Dazu zählt z. B. der Einsatz von CAD in der Vermessung, in der Kartographie, in der Stadtplanung und in der Fabrikplanung.

Computer Aided Engineering (CAE)

Das Computer Aided Engineering (deutsch: rechnerunterstützte Entwicklung) ist ein Sammelbegriff für alle mit Hilfe von Computerprogrammen durchgeführten Ingenieurarbeiten bei der Entwicklung, Planung, Berechnung, Simulation und Analyse im Bereich der Neukonstruktion oder auftragsbezogenen Projektierung.

Computer Integrated Manufacturing (CIM)

CIM (deutsch: rechnerintegrierte Produktion) beschreibt die Vision des integrierten EDV-Einsatzes in allen mit der Produktion zusammenhängenden Betriebsbereichen. Laut Scheer (1990) wird unter CIM ein Produktionskonzept verstanden, dessen Einrichtungen automatisiert und flexibel zugleich sind und das auf einer durchgängigen Verknüpfung des Material- und Informationsflusses beruht.

Concurrent Engineering

Concurrent Engineering bezeichnet eine integrierte Vorgehensweise zur optimalen Produkterstellung in einem interdisziplinären Team (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013).

Cyber Physical Systems (CPS)

Laut acatech und Forschungsunion (2013) umfassen Cyber Physical Systems eingebettete Systeme, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. Sie können daher auch als offene sozio-technische Systeme verstanden werden.

Datenkompression (auch: Datenkomprimierung)

Algorithmen zur Datenkompression erlauben die Reduktion der Größe einer Datei (in Byte) ohne wesentlichen Informationsverlust. Die Algorithmen werden nach den zu komprimierenden Datenarten wie Texte, Bilder, Filme und Musik und nach verlustbehafteten und verlustlosen Algorithmen unterschieden.

Datenmanagement

Datenmanagement ist ein übergeordneter Begriff für alle anfallenden organisatorischen und technischen Aufgaben, die der Konzeption und dem Entwurf von Daten sowie ihrer Haltung und Bereitstellung dienen.

Digitalisierung

Die Digitalisierung bezeichnet den Prozess, nicht als digitale Daten vorliegende Informationen in eine vom Rechner verarbeitbare digitale Form zu überführen.

Digitale Fabrik

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und 3D-Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Prozesse und Ressourcen der Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“ (VDI 4499 Blatt 1 2008, S. 3).

Digital Mock-Up (DMU)

Als Digital Mock-Up (DMU) wird die Repräsentation eines realen Produktes in einem digitalen Modell bezeichnet (Döllner und Kellner 2000). Dieses Modell setzt sich aus Einzelteilen und Produktgruppen (geometrische Informationen), Funktionen sowie produktionstechnischen Informationen zusammen. Mit der zusätzlichen Angabe der Fertigungsfolge lässt sich für jeden Fertigungsschritt der aktuelle Bauzustand des Produktes abbilden.

Digitaler Schatten

Der Digitale Schatten als ein Handlungsfeld von Industrie 4.0 ist das „hinterreichend genaue“ Abbild der Prozesse „in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten“ zu schaffen. Im Einzelnen gehört dazu die Beschreibung der notwendigen Datenformate, der Datenauswahl und der Datengranularitätsstufe (Bauernhansl et al. 2016, S. 23).

Digitaler Zwilling

Neben dem Begriff des Digitalen Schattens ist der Begriff des Digitalen Zwillings verbreitet. Der Digitale Schatten überführt zunächst den realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt. Der Digitale Zwilling kann darauf aufbauend durch ein Prozessmodell und Simulation ein möglichst identisches Abbild der Realität liefern (Bauernhansl et al. 2016, S. 23).

Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit beschreibt die Zeitdauer zwischen dem Zeitpunkt des Eintreffens eines Auftrages in der Fertigung und dem Zeitpunkt des Austritts aus der Fertigung (Fertigungsdurchlaufzeit). Sie setzt sich zusammen aus Durchführungszeiten, Übergangszeiten sowie Wartezeiten.

E-Collaboration

Unter E-Collaboration werden im weitesten Sinne alle Formen der computerbasierten synchronen oder asynchronen Kollaboration verstanden. Sie schließt eine systematische gemeinsame Bearbeitung, Nutzung und Verteilung elektronischer Dokumente von mindestens zwei beteiligten Akteuren in möglicherweise zeitlicher und/oder räumlicher Trennung ein.

Enterprise Resource Planning (ERP)

ERP-Systeme kennzeichnen einen übergeordneten „Sammelbegriff für Informationssysteme, die Unternehmensressourcen planen und verwalten.“ (VDI 4499 Blatt 2 2011, S. 48)

Fabrik-DMU

Das Ziel des Fabrik-DMU (Digital Mock Up) ist die ganzheitliche Beschreibung der Fabrik schon ab der Konzeptplanung. Dabei werden das Gebäude, seine Einrichtungen sowie die geplanten Fertigungsanlagen aller Gewerke in einem 3D-Gesamtmodell zusammengeführt. Anhand dieses Modells können frühzeitig gewerkeübergreifende Lösungen gefunden, Kollisionen und Fehler vermieden sowie letztendlich Gesamtoptima abgesichert werden.

Fabrikplanung

Fabrikplanung ist der systematische, zielorientierte, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion (VDI 5200 Blatt 1 2011, S. 3).

Fabrikstruktur

Die Fabrikstruktur bezeichnet die Gliederung der Fabrik in Bereiche und deren innerbetriebliches Beziehungsgefüge. Sie unterliegt produktions-technischen, logistischen, arbeitsorganisatorischen und weiteren Gesichtspunkten der Führungsorganisation.

Facility Management

Facility Management ist die Gesamtheit aller Leistungen zur optimalen Nutzung der betrieblichen Infrastruktur auf der Grundlage einer ganzheitlichen Strategie. Betrachtet wird dabei der gesamte Lebenszyklus einer Einheit (z.B. Gebäude, Liegenschaft, usw.) von der Planung und Erstellung bis zum Abriss oder Umnutzung. Ziel ist die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, die Werterhaltung, die Optimierung der Gebäudenutzung und die Minimierung des Ressourceneinsatzes zum Schutze der Umwelt. Das Facility Management umfasst gebäudeabhängige und gebäudeunabhängige Leistungen (DIN 32736 2008).

Finite-Element-Methode (FEM)

Die Finite-Element-Methode (FEM) beschreibt eine Methode zur Diskretisierung, die vor allem für numerische Berechnungen im strukturmechanischen Bereich, aber auch bei strömungsmechanischen Fragestellungen ihre Anwendung findet.

Flexibilität der Produktion

Flexibilität der Produktion bezeichnet die Eigenschaft eines in bestimmten zeitlichen Grenzen als konstant betrachteten Produktionssystems, sich verändernden Anforderungen aus Teileprogramm und technologischem Prozess ohne Veränderungen von Elementmenge und Struktur anpassen zu können.

Frontloading

Frontloading bezeichnet die Veränderung des Produktentstehungsprozesses durch die Verlagerung einzelner Prozessabschnitte in eine frühere Prozessphase. Das Frontloading wird zum Teil durch die Verwendung digitaler Techniken wie Methoden und Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung und Digitalen Fabrik ermöglicht.

Gebäude

Nach Bauordnung sind Gebäude selbständig nutzbare, überdachte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen.

Genetischer Algorithmus

Ein genetischer Algorithmus bezeichnet einen Algorithmus, der „Strategien aus der Evolutionstheorie verwendet, um zu einem Problem eine möglichst gute Lösung zu finden“ (vgl. Claus und Schwill 2006; s. v. Genetischer Algorithmus). Ausgehend von einer Anfangspopulation erzeugt man neue Individuen, bewertet diese und lässt einige überleben. Durch entsprechende Wiederholung entsteht eine Folge von Populationen, aus denen man hofft, eine möglichst gute Lösung für das vorgegebene Problem zu finden.

Gewerk

Der Begriff Gewerk hat in einzelnen Anwendungen unterschiedliche Bedeutungen, beispielsweise:

1. Bauwesen: Bezeichnung für die einem Handwerk zugeordneten Leistungen in einem Gebäude, z. B. Mauern, Tischlerarbeiten, Elektroinstallation, Heizungsbau.
2. Automobilindustrie: Bezeichnung für einen Fertigungsbereich z. B. Presswerk, Karosseriebau, Lackierung, Endmontage.

Herstellkosten

Unter Herstellkosten werden alle Kosten, die bei der Herstellung eines Produktes anfallen, zusammengefasst. Neben den Lohnkosten gehen in die Herstellkosten vor allem die Materialkosten, die Abschreibungen für die Investitionen, die Wartungskosten, die Kosten für Instandhaltung und die Energiekosten ein.

Industrial Engineering (IE)

Bezeichnet die Planung einer Produktion, wobei die Tätigkeiten der manuellen Arbeit im Detail erfasst, geplant und dokumentiert werden. Hierzu gehören die Zeitwirtschaft, bei der die Dauern der einzelnen Arbeitsschritte berechnet werden, die Ergonomie, welche die körperliche Belastung plant und optimiert, sowie die Gestaltung der Arbeitsplätze.

Industrie 4.0

Der Kern der vierten industriellen Revolution ist das Internet der Dinge und die neuen Möglichkeiten, Ressourcen, Dienste und Menschen in der Produktion auf Basis Cyber-physischer Systeme in Echtzeit zu vernetzen. Nicht die Digitalisierung ist also das Revolutionäre, sondern die Möglichkeiten der Vernetzung technischer Systeme in Echtzeit sowie das, was uns die IT heute und zukünftig bietet, nämlich die Kommunikation und Datenhaltung per Internettechnologien sowie die exponentielle Steigerung der Rechenleistung (Standpunkt WGP: Bauernhansl 2016; Bauernhansl et al. 2016).

Initial Graphics Exchange Specification (IGES)

IGES ist ein herstellerunabhängiges, nicht standardisiertes Dateiformat zum digitalen Austausch von Informationen zwischen CAD-Programmen, das von STEP abgelöst wurde.

Information

Information umfasst eine Nachricht zusammen mit ihrer Bedeutung für den Empfänger (vgl. Claus und Schwill 2006, s. v. Information). Sie ent-

steht durch die Interpretation von Daten und beinhaltet somit die Bedeutung der Daten bzw. der Zeichenfolge im jeweiligen Kontext.

Internet der Dinge

Im Bereich der Logistik versteht man unter dem Internet der Dinge (vgl. Bullinger und ten Hompel 2007; Fleisch 2005) ein Lösungskonzept, in dem autonome logistische Objekte, wie Transportgut, ein Ladungsträger und auch Transportsysteme, durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien selbstständig Steuerungsentscheidungen treffen und ihren Weg bestimmen.

Interoperabilität

Im allgemeinen Sinne bezeichnet Interoperabilität die Fähigkeit der Zusammenarbeit unterschiedlicher Systeme, zu denen technische oder EDV-technische Systeme sowie Organisationen sowohl auf administrativer als auch auf personeller Ebene zählen.

Jupiter Tesselation (JT)

JT bezeichnet ein 3D-Datenformat zur Darstellung großer CAD-Dokumente etwa für die Produktvisualisierung oder die Unterstützung eines Fertigungsprozesses.

Just-In-Time (JIT)

JIT ist das vierte Element des Toyota Produktionssystems und zielt darauf ab, die Bereitstellung aller zur Produktion notwendigen Faktoren nur in den Mengen und zu den Terminen, wie sie benötigt werden, d. h. gerade rechtzeitig, durchzuführen (vgl. beispielsweise Wiendahl 2010).

KMU

Der Begriff KMU (Kleine und mittlere Unternehmen) ist eine Sammelbezeichnung für Unternehmen, die nach der Definition des Institutes für Mittelstandsforschung (IfM Bonn 2010) unter 500 Mitarbeitern und 50 Mio. € Umsatzerlösen liegen.

Lastenheft

In einem Lastenheft werden alle Anforderungen des Auftraggebers einer Dienstleistung bezüglich des Liefer- und Leistungsumfangs beschrieben (vgl. auch VDI 3633 Blatt 2 1997). Es ist vom Auftragsgeber oder in des-

sen Auftrag möglichst vollständig und widerspruchsfrei zu erstellen und soll Antworten auf die Frage „was“ „zu welchem Zweck“ zu realisieren ist, geben.

Layout

Ein Layout ist definiert als die räumliche Anordnung von betrieblichen Struktureinheiten (Schenk et al. 2014). Layoutarten entstehen in Abhängigkeit vom Betrachtungsgegenstand, dem Bezug zur Realität und dem Abstraktionsgrad, beispielsweise als Grob-/ Feinlayout, Real-/ Ideallayout oder Werks-/ Fabrik-/ Maschinenlayout.

Layoutplanung

Die Layoutplanung umfasst einen Planungsvorgang, in dem Ressourcen wie Maschinen oder Transportsysteme innerhalb des geplanten Systems angeordnet werden. Die Layoutplanung kann durch Mittel der rechnerunterstützten Fabrikplanung effizienter vollzogen werden, bedarf aber nach wie vor der planerischen Erfahrungen (Schmigalla 1995).

Lean Production

Unter Lean Production versteht man einen Ansatz für eine Unternehmensstrategie, die aus einem System von Zielen, Grundsätzen und Maßnahmen besteht, das in seiner Gesamtheit einen „schlanken“ und damit besonders wettbewerbsfähigen Zustand eines Unternehmens ermöglicht.

Der Begriff geht auf eine umfassende Analyse der Produktionsmethoden japanischer Automobilhersteller zurück (Womack et al. 1992) und wird einerseits als Gegensatz zur handwerklichen und zur Massenproduktion variantenärmer Erzeugnisse und andererseits als eine Kombination beider verstanden.

Logistik

Logistik bezeichnet die wissenschaftliche Lehre der Planung, Gestaltung, Steuerung und Kontrolle der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in oder zwischen Unternehmen sowie in Unternehmensnetzen (in Anlehnung an Jünemann 1989). Man unterscheidet für ein Unternehmen die Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik.

Losgröße

Die Losgröße ist der unter Kosten-/Leistungsgesichtspunkten ermittelte Wert für die in einem Produktionsauftrag an einer Maschine herzustellende

Anzahl eines Teiles. Die gemeinsam produzierten Teile werden als Los bezeichnet.

Make-or-Buy

„Make-or-Buy“ ist eine Frage zur Entscheidung von Eigen- und Fremdbezug, d. h. ob ein Einzelteil oder eine Baugruppe selbst gefertigt oder bezogen werden solle.

Manufacturing Execution System (MES)

Manufacturing Execution Systeme (auch Fertigungsleitsysteme, Produktionsleitsysteme) sind auf der Fertigungsleitebene einzuordnen und bezeichneten Fertigungsmanagementsysteme (VDI 5600 Blatt 1 2016), die im Wesentlichen die Aufgaben Feinplanung und -steuerung, Informationsmanagement, Qualitäts-, Personal-, Betriebsmittel- und Materialmanagement, Leistungsanalyse und Datenerfassung unterstützen.

Methode

Eine Methode bezeichnet eine „systematische zielgerichtete Vorgehensweise sowie durchdachtes Verfahren, welches für eine Vielzahl von Problemen zu einer sinnvollen Lösung führt.“ (Claus und Schwill 2006, s. v. Methoden der Informatik).

Migration

Migration bezeichnet die Umstellung von Prozessen und Daten einer bestehenden Applikation in eine neue Version oder eine andere Applikation.

Mixed Reality

Nach Broll (2013) bedeutet Mixed Reality eine Vermischung von virtuellen und realen Inhalten; sie stellt im Gegensatz zur AR (Augmented Reality) ein Kontinuum zwischen Realität und Virtualität dar, in dem die Realität kontinuierlich abnimmt und sich der Anteil an Virtualität erhöht. Bei einem höheren Anteil an Realität als an Virtualität wird von AR, bei einem höheren Anteil an Virtualität als an Realität von Augmentierter Virtualität (Augmented Virtuality) gesprochen.

Modell

Ein Modell ist eine „Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der un-

tersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“ (VDI 3633 Blatt 1 2014, S. 3).

Product Data Management (PDM)

Product Data Management Systeme (PDM-Systeme) bezeichnen laut VDI 2219 (2016) technische Datenbank- und Kommunikationssysteme. Ihre Aufgabe ist, „Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse bzw. Lebenszyklen konsistent zu speichern, zu verwalten und transparent für alle relevanten Bereiche eines Unternehmens bereitzustellen“ (VDI 2219 2016, S. 9).

PPR-System

In einigen Umsetzungen zur Digitalen Fabrik stellt das PPR-System die Basis zur simultanen Planung von Produkt, Prozess und Ressourcen (PPR) dar.

Pflichtenheft

Im Pflichtenheft wird die Realisierung aller Anforderungen aus dem Lastenheft beschrieben. Hier wird definiert, wie und womit die Anforderungen zu realisieren sind (vgl. auch VDI 3633 Blatt 2 1997).

Produktentstehungsprozess (PEP)

Der Produktentstehungsprozess beschreibt den Entwicklungsprozess eines neuen Produktes von der Produktidee bis zum Produktionsbeginn (Start of Produktion, SOP). Der PEP umfasst sowohl die Aufgaben der Konstruktion zur Serienreife, der Entwicklung des Produktes und der Produktion zur Vorbereitung der Produktionsprozesse und Ressourcen als auch die Aufgaben der Vertriebs zur Marktanalyse sowie zur Organisation des Produktvertriebs und des Einkaufs zur Beschaffung der Zukaufteile und Materialien für die geplanten Produktionsumfänge.

Product Lifecycle Management (PLM)

PLM bezeichnet ein IT-basiertes Lösungssystem, mit dem alle Daten, die bei der Entwicklung, Produktion, Lagerhaltung und dem Vertrieb eines Produktes anfallen, einheitlich gespeichert, verwaltet und abgerufen werden. Im Idealfall werden alle IT-Systeme, die mit einem Produkt in Berührung kommen, über ein gemeinsames Datenmanagement verwaltet: Von der Planung (PPS/ERP), Konstruktion (CAD), Berechnung (CAE) und

Fertigung (CAM) bis zum Controlling, Vertrieb und Service. Ziel ist, dass ein PLM-System den gesamten Lebenszyklus eines Produktes begleitet.

Produktionslogistik

Die Produktionslogistik bezeichnet die Gesamtheit der Funktionen und Tätigkeiten im Rahmen der Logistik, die für die Produktion erforderlich sind. Die Produktionslogistik ist Teil der logistischen Kette zwischen Beschaffungs- und der Distributionslogistik. Sie ist das Kernstück der Unternehmenslogistik.

Produktionsprogramm

Ein Produktionsprogramm umfasst alle Aufträge (Fertigungsaufträge, Beschaffungsaufträge), die von einem Betrieb oder Bereich in einer bestimmten Periode (Planungszeitraum) abgearbeitet werden sollen.

Projekt

Ein Projekt ist ein „Vorhaben, das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist“ (DIN 69901-5 2009, S. 11). Es wird durch eine Zielvorgabe, die zeitlichen, finanziellen, personellen oder andere Randbedingungen, die zeitliche Abgrenzung gegenüber anderen Vorhaben und die projektspezifische Organisation charakterisiert.

Prozess

Ein Prozess bezeichnet nach DIN IEC 60050-351 (2014) die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden. Ein Prozess ist eine in der Länge oder Dauer nicht begrenzte Folge von Funktionen bzw. Aktivitäten, wobei eine Funktion/Aktivität durch ein oder mehrere Ereignisse gestartet wird und in einem oder mehreren Ereignissen endet.

Rechnerunterstützte Fabrikplanung

Die rechnerunterstützte Fabrikplanung umfasst die EDV-Unterstützung bei der Analyse, Zielfestlegung, Funktionsbestimmung, Dimensionierung, Strukturierung, Integration und Gestaltung von Fabriken als System sowie auch ihrer Teilsysteme, Elemente, Substrukturen und Prozesse. Die Rechnerunterstützung bezieht sich sowohl auf die Informationsgewinnung als auch auf die Informationsverarbeitung.

Ressource

Unter Ressourcen werden alle Mittel verstanden, die zur Durchführung eines Prozesses oder allgemein zur Erfüllung einer Aufgabe notwendig sind. Im Kontext der Produktion bezeichnet der Begriff u. a. Betriebsstätten und Arbeitsplätze, Betriebsmittel und -hilfsmittel, Personal sowie Aufgaben- und Ablaufbeschreibung, jedoch nicht den Arbeitsgegenstand oder das zu produzierende Produkt selbst.

Semantik

Unter Semantik wird die Bedeutung von Daten bzw. Zeichenfolgen im jeweiligen Kontext verstanden. Die Bedeutung kann in unterschiedlichen Zusammenhängen abweichen (z. B. hat die Zeichenkette BANK unterschiedliche Bedeutungen).

Simulation

Simulation ist eine experimentelle Problemlösungsmethode. Laut VDI 3633, Blatt 1 (2014, S. 3) bezeichnet Simulation „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“

Simultaneous Engineering

Das Simultaneous Engineering kennzeichnet nach Wiendahl (2010) eine Vorgehensweise, bei der sich Teams aus MitarbeiterInnen mehrerer Abteilungen bilden, um gemeinsam ein Problem zu bearbeiten. Sie beinhaltet eine zielgerichtete und interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit mehrerer Abteilungen.

Smart Factory

Der Begriff Smart Factory steht für die vollvernetzte intelligente Fabrik der Zukunft. Sie zeichnet sich durch eine neue Intensität sozio-technischer Interaktion aller an der Produktion beteiligten Akteure und Ressourcen in Echtzeit aus. Im Mittelpunkt steht eine Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, sich selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Produktionsressourcen (Produktionsmaschinen, Roboter, Förder- und Lagersysteme, Betriebsmittel) inklusive derer Planungs- und Steuerungssysteme (acatech und Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft 2013).

Social Media

Der Begriff umfasst alle internetbasierten Medien zum Austausch von Inhalten zwischen Personen, wie beispielsweise Ideen, Bilder, Daten und Software. Foren, Blogs, Wikis, soziale Netzwerke oder auch Auskunftsportale gehören beispielsweise zu diesen Medien.

Start of Production (SOP)

Start of Production bezeichnet den Zeitpunkt des Beginns der Serienproduktion eines neuen Produktes oder einer neuen Fertigungsanlage.

Standard for Exchange of Product Model Data (STEP)

Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) ist ein internationaler Standard, der zur Beschreibung von physikalischen und funktionalen Merkmalen von Produktdaten dient.

Struktur (eines Systems)

Die Struktur ergibt sich nach DIN IEC 60050-351 (2014) aus den Beziehungen zwischen den Elementen eines Systems.

Supply Chain

Eine Supply Chain bezeichnet die Versorgungskette eines Produktes vom Rohstofflieferanten über die Fertigung bis zum Verbraucher.

Syntax

Die Regeln, nach denen Zeichen zu Zeichenfolgen zusammengesetzt werden, bezeichnet man als Syntax. Zeichenfolgen, die nicht nach den in den jeweiligen Kontexten geltenden Regeln aufgebaut werden, sind syntaktisch falsch und somit nicht verarbeitbar.

System

Ein System ist eine von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von in Beziehung stehender Elementen (in Anlehnung an DIN IEC 60050-351 2014). Systemelemente können ihrerseits wieder Systeme (Subsysteme) darstellen. Sie sind miteinander verknüpft und stehen in Wechselwirkung zueinander. Beispiele für Systemelemente sind Betriebsmittel, Aufgaben, Aufgabenträger, Sachmittel und Informationen eines Unternehmens, die durch Aufbau- und Ablaufbeziehungen miteinander verbunden werden.

Unified Modeling Language (UML)

Die Unified Modeling Language (UML) ist eine standardisierte objekt-orientierte grafische Modellierungssprache, die häufig in der Softwareentwicklung und bei Systemanalyse und -design eingesetzt wird. Sie stellt unterschiedliche Struktur- und Verhaltensdiagramme zur Modellierung eines Systems wie beispielsweise Klassenstrukturdiagramme, Sequenzdiagramme, Zustandsdiagramme, Aktivitätsdiagramme zur Verfügung (vgl. beispielsweise Booch et al. 2006).

Validierung

Die Validierung ist die Überprüfung, ob ein Modell das richtige Modell für eine Aufgabenstellung ist. Für Simulationsmodelle impliziert dies die Beantwortung der Frage, ob das Modell das reale System und sein Verhalten genau genug und fehlerfrei abbildet (vgl. Rabe et al. 2008, S. 15).

Verifikation

Die Verifikation beantwortet die Frage, ob ein erstelltes Modell richtig ist. Dies impliziert „die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ (vgl. Rabe et al. 2008, S. 14). Bei Simulationsmodellen lässt sich aufgrund der hohen Modellkomplexität in der Regel kein vollständiger formaler Korrektheitsnachweis führen (vgl. Rabe et al. 2008, S. 14).

Virtual Reality (VR)

„Die Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die es erlaubt, in eine computergenerierte, dreidimensionale virtuelle Welt einzutauchen, diese als Realität wahrzunehmen, Bestandteil dieser zu sein und mit ihr zu interagieren. Als Teil der computergenerierten Welt kann man diese von verschiedenen Positionen aus betrachten und sie unmittelbar verändern.“ (VDI 3633 Blatt 11 2009, S. 3)

Virtuelle Produktion

Der Begriff Virtuelle Produktion bezeichnet die durchgängige Planung, Evaluierung und Steuerung von Produktionsprozessen sowie -anlagen mithilfe digitaler Modelle. Ziel ist die vollständige Abbildung des Produktes und der Produktion in einem experimentierbaren Modell über den gesamten Lebenszyklus des Produktes und Produktionssystems (Reinhart et al. 1999; Zäh und Müller 2004; Spur 2001b).

Virtuelles Unternehmen

Unter einem Virtuellen Unternehmen ist ein temporärer Zusammenschluss von rechtlich und wirtschaftlich unabhängigen Unternehmen, Institutionen und/oder Einzelpersonen zu verstehen. Diese Art der Kooperation dient dem Zwecke der gemeinsamen Leistungserbringung zur Realisierung von Wettbewerbsvorteilen und Nutzung neuer Marktchancen durch einen gemeinsamen Marktauftritt (Hansmann und Ringle 2005; Mertens et al. 1998).

Walzprofilieren

Walzprofilieren bezeichnet ein kontinuierliches Biegeverfahren, bei dem Bandmaterial aus Blech von einer Anzahl Walzenpaaren schrittweise zum gewünschten Endquerschnitt umgeformt wird.

Werksstrukturdatenbank

Eine Werksstrukturdatenbank bezeichnet die Datenbasis für die rechnerunterstützte Fabrikplanung, die Digitale Fabrik und das Objektmanagement, die eine eindeutige Beziehung zwischen den alphanumerischen Daten der Objekte einerseits und den grafischen Daten der Lage-, Einrichtungs- und Aufstellungspläne andererseits ermöglicht (Bracht 1984).

Wissen

Wissen verknüpft Informationen, die zusammengenommen wiederum neue Aussagen ergeben. Wissen ist allerdings an das Bewusstsein gebunden und entsteht beim Bewusstseinsträger; es ist oft nur schwer formalisier- und kommunizierbar. Explizites Wissen ist formal beschreibbar, dokumentierbar und damit vermittelbar. Implizites Wissen (Erfahrungswissen, soziale Kompetenz) ist schwer fassbar und somit auch kaum formalisierbar.

Workflow

Als Workflow wird die IT-gestützte Umsetzung eines Geschäftsprozesses bezeichnet; hier wird festgelegt, welche Dokumente, Informationen und Aufgaben von welchen Akteuren, wann und in welcher Reihenfolge nach welchen Regeln zu bearbeiten sind. Ein Workflow ist somit ein Instrumentarium zur Steuerung und zur Kontrolle von Geschäftsprozessen.

Workflowmanagementsystem

Ein Workflowmanagementsystem ist ein Programm zur Abwicklung und Verwaltung von Workflows.

Abkürzungsverzeichnis

AMP	Alternierendes Mehrstufiges Projektteam
ANSI	American National Standards Institute
ANX	Automotive Network Exchange
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASP	Application Service Provider
Auto-ID	Automatische Identifikation
AutomationML	Automation Markup Language
B2B	Business to Business
BDE	Betriebsdatenerfassung
Bemi	Betriebsmittel
BIM	Building Information Modeling
BOM	Bill of Material
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPMN	Business Process Modeling Notation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
CAFM	Computer Aided Facility Management
CALP	Computer Aided Layout Planning
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CAPP	Computer Aided Process Planning
CAQ	Computer Aided Quality Assurance
CAS	Computer Aided Styling
CAVE	Cave for Automated Virtual Environment
CAx	Computer Aided x
CBP	Collaborative Business Process
CDS	Construction Drawing Subset
CE	Concurrent Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CKD	Completely Knocked Down
CNC	Computerized numerical control

COLLADA	COLLAborative Design Activity
CPM	Critical-Path-Method
CPS	Cyber Physical System
CRM	Customer Relationship Management
CSCW	Computer Supported Collaborative Work
DBMS	Database Management System
DDL	Data Definition / Description Language
DES	Discrete Event Simulation
DEV	Digital Engineering Visualization
DF	Digitale Fabrik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMU	Digital Mock-Up
Dod	Department of Defence
DPE	DELMIA Process Engineer
DML	Data Manipulation Language
DMSO	Defense Modeling and Simulation Office
DSDL	Data Storage Description Language
DTD	Document Type Definition
DXF	Drawing Interchange Format
E-CAD	CAD für Elektronik und Elektrotechnik
EAI	Enterprise Application Integration
ECR	Engineering Change Request
ECM	Engineering Change Management
EDA	Electronic Design Automation
EDI	Electronic Data Interchange
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
eEPK	erweiterte ereignisgesteuerte Prozessketten
EHPV	Engineered Hours per Vehicle
ENGDAT	Engineering Data Message
ER	Entity Relationship
ERP	Enterprise Resource Planning
EVA	Earned Value Analysis
FAPLIS	Fabrikplanungs- und Informationssystem
FBX	Film BoX
FCFS	First-Come-First-Served
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FE	Finite-Element
FEM	Finite-Element-Methode
FIFO	First-In-First-Out
F/L	Functional / Logical
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
FVM	Finite-Volumen-Methode
GIF	Graphic Interchange Format
GIS	Geographisches Informationssystem

Abkürzungsverzeichnis

GPS	Global Positioning System
HLA	High Level Architecture
HLS	Hallenlayoutsystem
HMD	Head-Mounted Display
HTML	Hypertext Mark-up Language
IAI	International Association of Identification
IEC	International Electronie Commision
IEEE	Institute of electrical and Electronics Engineers
IFC	Industry Foundation Classes
IGES	International Graphics Exchange Specification
IP	Intellectual Property
ISD	International Organisation of Standardisation
ISO	International Standards Organization
IT	Informationstechnik
JIS	Just in Sequence
JIT	Just in Time
JPEG	Joint Photographic Expert Group
JT	Jupiter Tessellation
KBE	Knowledge Based Engineering
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KNN	Künstliches neuronales Netz
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LIFO	Last-In-First-Out
LP	Lineare Programmierung
LZA	Langzeitarchivierung
M-CAD	CAD für Mechanik
MAS	Multiagentensystem
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MIP	Mixed Integer Program
MKS	Mehrköpersimulation
MOM	Manufacturing Operations Management
MP3	MPEG 1 Audio Layer 3
MPEG	Moving Picture Experts Group
MPM	Metra-Potential-Method
MR	Mixed Reality
MTA	Meilensteinanalyse
NC	Numerical Control
NVH	Noise Vibration Harshness
OCR	Optical Character Recognition
ODETTE	Organisation for Data Exchange by Tele Transmission in Europe
OEM	Original Equipment Manufacturer
OFTP	Odette File Transfer Protocol
OLE	Object Linking and Embedding

OP	Operationsstufe im Presswerk
OPC	OLE for Process Control
OPC UA	OPC Unified Architecture
OWAS	OVAKO Working-PostureAnalysingSystem
PC	Personal Computer
PDF	Portable Document Format
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PLM	Product Lifecycle Management
PPR	Produkt Prozess Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PQ-Analyse	Produkt Quantum-Analyse
QL	Query Language
RAMI4	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
RFID	Radio Frequency Identification Device
RTI	Runtime Infrastructure
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SAS	Statistical Analysis System
SASIG	Strategic Automotive product data Standards Industry Group
SCM	Supply Chain Management
SDM	Simulationsdatenmanagement
SDX	Simulation Data Exchange
SGI	Silicon Graphics
SIMoFIT	Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering
SJF	Shortest-Job-First
SOA	Serviceorientierte Architektur
SOP	Start of Production
SPARC	Standards Planning and Requirements Committee
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
SRM	Supplier Relationship Mangament
SRPT	Shortest-Remaining-Processing-Time
STEP	Standard for Exchange of Product Model Data
STEP-CDS	STEP Construction Drawing Subset
STS	Simulation Toolkit Shipbuilding
TCO	Total Cost of Ownership
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TIA	Totally Integrated Automation
TIFF	Tagged Image File Format
TPR	Technische Produktreihenfolge
UML	Unified Modeling Language
URL	Uniform Resource Locator
V&V	Validierung und Vertifikation

Abkürzungsverzeichnis

VBA	Visual Basic for Application
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDAIS	Verband der Automobilindustrie-IGES Subset
VDAFS	Verband der Automobilindustrie-Flächenschnittstelle
VDABS	Verband der Automobilindustrie-Betriebsstätten
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VPM	Virtual Product Management
VR	Virtual Reality
VRML	Virtual Reality Modeling Language
W3C	World Wide Web Consortium
WfMC	Workflow Management Coalition
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik
WWS	Warenwirtschaftssystem
WWW	World Wide Web
X3D	Extensible 3D
XML	Extensible Markup Language

Sachverzeichnis

A

Abbild, reale Fabrik	274
ABC-Analyse	111, 415
Ablauf	
Ablaufplan, Umsetzung	243
Modellierung	101
Organisation	231, 415
Planung	28
Simulation	47, 78, 129, 254, 277
Energie	319
Abnahme	
virtuell	64
Absicherung	59
virtuell	40
Agentensystem	133, 415
Aggregat	295
Fertigung	295
Planung	296
Akzeptanz	336, 343
Anwender	231
Algorithmus	
generisch	422
genetisch	107, 108
AMP	247, 251
Analysemethode	106
Änderung	79, 230
Aufwand	57
Kosten	16, 81
Management	19, 178, 310, 312, 415
Produkt	61
Ursachen	313
Schleife	48
Sequenz	305
Änderungsmanagement	178
Anforderungen, Markt	249, 253, 304
Angebotsprozess	273
Animation	

Sachverzeichnis

2D.....	140
3D.....	140
Definition	142
online	143
playback	143
post-simulation	143
simulation-concurrent.....	143
Ankunftsprozess.....	112
Anlage	415
Anlauf.....	50
Engineering	81
Fundament.....	273
Lieferant.....	22, 324
Modell, virtuell.....	245
Projektierung, digital.....	355
Versorgung.....	35
Anlagenbau	20, 21, 324, 326
Anlauf.....	58
Anlage	50
Kosten	238
Produktion	55, 251
Anwendergruppe	255
Applikation.....	365, 416
mobil	359
Arbeits	
Folge.....	297, 298, 306, 308
Paket	248, 251
Planung	157
Planung	
computergestützt.....	194
Platz	
automatisiert.....	299
CAD-Modell	301
Ergonomie	300
manuell	300
Architektur	33, 207
3D.....	145, 270
Bus	212
High Level.....	218
Hub&Spoke	211
Modell	
virtuell	264
Point-to-Point.....	210
service-orientiert.....	214
System	
technisch	209
Archivierungskonzept.....	179
ASCII.....	204

Assistenzsystem	67
Logistiksteuerung	68
Aufbau, Präzision	273
Aufbauorganisation.....	67, 229, 245, 246, 250, 251, 254, 416
Aufheizprozess.....	293
Aufnahmeassistent	
smart	363
Aufwand	
Konvertierung.....	75
Reduzierung	58
Verschiebung.....	57
Augmented Reality.....	12, 137, 146, 167, 169, 416
Anwendungen	148
Definition.....	148
Hardwarekomponente	147
System	170
Technologie.....	150, 365
Tracking	148
Ausrüstung	
Gebäude	
Definition.....	33
Planung.....	33
Ausschreibung.....	272, 416
Unterlagen.....	64, 70, 74
Außenansicht	270
Außenhülle	309
Auswahl	
Technologie	38
AutomationML	209
Automatisierung	
System	198
Automobilindustrie	16, 281
Aggregatefertigung.....	295
Fabrikplanung.....	207
Fahrzeugendmontage	297
Ausbalancierung Stationen.....	301
Austaktung	300
Bandabgleich	300
Karosseriebau.....	286
Lackiererei	290
Presswerk	283
Zulieferer	22
Automotive Bausteinkasten	161
 B	
Bandabtaktung	47
Bandbelegung Automobil-Endmontage	42

Sachverzeichnis

Barcode	97
Bau	
Abweichung	273
Ausführung	273
Fortschritt	273
Überprüfung	77
BDE	91, 197
Bedarf, Produkt	249
Bedarfsprognose	302
Bedeutung	
Gesten	171
Bedien	
Prozess	113
Schnittstellen	86
System	113, 114
Theorie	112
Beeinflussung, Kosten	60
Befragung	89
Methode	90
Begehung	
virtuell	145
Behälter	276
Management	50
Prozesse	278
Positionierung	301
Schüttgut	276
Spezial	276
Standard	276
Transport	277
Beobachtung	89
Methode	
automatisch	90, 92
Fremdbeobachtung	91
manuell	90, 91
Selbstbeobachtung	91
Berater, extern	236, 237, 247
Bereitstellung	
Fläche	351
Ort	47
Teile	302
Beschaffung	
Logistik	45
Bestand	416
Bestandsdaten	
Fabrik	264
Pflege	19
Best-Practice-Lösung	36, 63, 416
Bestückungsroboter	104

Betrachtung	
Nutzen	54
Betriebs	
Kosten	237
Mittel.....	63, 297, 306, 417
Konstruktion	326
Planung.....	48
Stückliste	309
Phase	77
Betriebsstätte	417
Bewegungsaufnahmeverfahren	95
Bewegungsdaten	
Echtzeit.....	95
Bewertung	
Funktion	64
Nutzen	66
Bibliothek	75, 240, 315
3D-Objekt	207, 267
Baustein.....	278
Bausteine.....	161
CAD-Modell	279
Element	42, 75, 315
mit Fabrikmodulen.....	73
Objekt	
3D.....	268
Planungsobjekt.....	72
Ressource	36
Wissensmanagement	316
Big Data	183, 417
BIM	12, 262
Bindeglied	9
BPMN	101
Branch-and-Bound-Verfahren.....	107
Building Information Modeling	12, 262, 417
Business Re-Engineering.....	417

C

CAD.....	2, 418
3D....	45, 267, 269, 342
Daten.....	56
Fabrikplanung.....	5
Industriebau	260
Konstruktion	59
Schnittstelle.....	352
System	3
Viewer	242
Werkzeug	192

Sachverzeichnis

CAE.....	194, 418
Werkzeug	193, 195
CAEX.....	209
CAFM	
Software.....	197
CALP	194, 195
CAM	6, 198
Werkzeug	192, 193
CAP	194
CAPP	194
CAQ	
Werkzeug	198
carbonfaserverstärkte Kunststoffe	289
CAS	
Werkzeug	193
CAVE.....	166
Projektionssystem.....	161
CAx-System	192
CFD.....	118, 126
CFK	289
Checkliste.....	70, 271, 313
CIM.....	5, 6, 418
Definition	6
CKD Logistik.....	141
Cloud Computing.....	79, 151, 417
Cockpитеинbau	300
Collaborative (Virtual) Engineering	151, 171, 418
COLLADA	209
Computer Aided Facility Management	196
Computer Aided Manufacturing	6
Computer Integrated Manufacturing.....	5
Computer Supported Collaborative Work	154
Computeranimation.....	142
Concurrent Engineering	418
CORBA.....	217
Cyber Physical Systems (CPS).....	14, 52, 417, 419

D

Darstellungs	
Graph	137
Methode	
Definition.....	99
Data Mining	302
Datei.....	200, 213
Daten	89, 173
Aktualität	177, 183
Analyse.....	110, 175

Aufbereitung	175
Aufnahmeassistent	
smart	363
Austausch	200, 207
asynchron	182
Format	201, 205, 230
Standardschnittstellen.....	75
synchron	182
Durchgängigkeit	20, 78
Erfassung	89
Erhebung	
automatisch.....	92
manuell.....	89
Primärdaten.....	89
Sekundärdaten	89, 98
Export	200
Flussdiagramm	102
Format.....	183, 200, 243
Austausch	200
De-facto-Standard	203
herstellerunabhängig, nicht standardisiert	204
native.....	202
proprietär	202
proprietär, offengelegt.....	203
standardisiert	205
Genauigkeit	177
Generierung	344
Glaubwürdigkeit	183
Granularität	177, 179
Gültigkeit.....	179
Import.....	200
Integrität	177, 207
Komprimierung.....	419
Konsistenz	176, 177
Konvertierung.....	200
Korrektheit	177
Management.....	71, 229
durchgängig	342
Mengen	183
Modell	56, 67, 82, 104, 240, 358
Modellierung	102
Organisation.....	175
Reduktion	200, 270, 346
Redundanz	177
Reporting	178
Schutz.....	177, 325
Sicherheit.....	177, 178
Strukturierung	175

Sachverzeichnis

Unversehrtheit.....	177
Validität	177
Verwaltung.....	175, 177
Vollständigkeit.....	177
Datenbank.....	175
Managementsystem.....	175
System.....	153, 175
Wissensbasis	72
Datenbanksystem	153
Datenbasis	175
redundanzfrei.....	72
Datenbrille	169
Datenerfassungsgeräte	91
Datenerhebung.....	88
integriert	89
Datenhandschuh.....	167, 168
Datenmanagement	18, 19, 66, 153, 173, 175, 177, 419
Begriffsdefinition.....	173
Definition	174
durchgängig.....	175, 179
Datenmodell	176
objektorientiert.....	176
relational.....	176
Datenstruktur.....	68
Decklackierkabine	291
DES.....	128
Detaillierungsgrad.....	236, 252, 269, 273, 337, 347
Diagramm	137
Differenz Modell Realität.....	77
Digital	
Abnahme.....	81
Absicherung	51
Fabrikbetrieb.....	13
Produkt.....	14, 48
Produktionsplanung	13, 36
Prozessmuster	
Definition.....	37
Digital Engineering Visualization.....	192, 194
Digital Enterprise Suite	222
Digital Mock-Up	14, 306
Fabrik	34, 257, 271, 272
Montage.....	297
Digitale Fabrik	9, 419
Anlagenbau	324
Anwendungsfelder.....	26, 27
Basis	
Industrie 4.0	25
Definition	11

Einführung.....	229, 232
Phasen	233
Herausforderung	19
KMU.....	235, 340
Konzern	236
Lean Philosophie	371
Logistik	47
Nutzen	54, 56
organisatorischer Ansatz	246
Problemfelder	230
Produktentstehung	86
Schiffbau.....	23, 353
Technik	86
Umsetzung	18
Umsetzungsstand	18, 19
Vernetzung	18
Wirtschaftlichkeit	81
Digitale Logistik	47
Digitale Produktionsplanung.....	13
Digitale Transformation	376
Digitale Werft.....	23, 353
Digitaler Fabrikbetrieb	13, 78
Digitaler Schatten.....	13, 52, 83, 420
Digitaler Zwilling.....	13, 52, 83, 160, 225, 420
Digitales Produkt.....	14
Digitales Prozessmuster	38, 253
Digitales Unternehmensnetzwerk.....	254
Digitalisierung	419
3D.....	264
Dimensionsreduktion	200
Distribution	
Logistik	46
DMU	14, 420
Fabrik	14, 421
Dokumentenanalyse	89, 98
Dokumentenmanagement	
System	199
Double-Row-Facility-Layout-Problematik (DRFLP)	44
Drohne	365
Einsatz	367
Drucker	
3D....	62
Durchlaufzeit.....	60, 420
Verbesserung	60
DXF	203

E

EAI.....	214
Earned Value Analysis.....	156
Ebene	
pragmatisch	185
semantisch	184
strategisch.....	186
syntaktisch	184
E-CAD	
System.....	193
Echtzeit	
kommunizieren	25
Monitoring	369
E-Collaboration	151, 420
EDI.....	202
EHPV	307
Einbauprozess.....	301
Einführung	
Digitale Fabrik	229, 235, 236, 340
Phasen.....	233
Planung	244
projektbezogen	236
Prozess	231
Einsatzfelder	234
Eintakten	
virtuell	42
Einzelarbeitsplatz.....	162
Einzelteilstoffigung	79
Elektrotauchlackierung	39
Simulation	39
Embedded Planning	251, 253
Phasenfolge.....	251
Embedded System	251
Endgeräte	
mobile	12
Endmontage	
Automobil	42
Bandbelegung	42
realgemischt.....	42
Versorgung.....	46
Energie	316
Ablaufsimulation	319
Berechnung	320
Bilanzierung.....	318
Einsparung	320
Prognose	319
Roboterverbrauchssimulation.....	323

Simulation	
Roboter.....	323
Verbrauch	
Optimierung	321
Prognose.....	320
Verteilung.....	317
Verbrauch Automobilindustrie.....	316
Verbrauchsreduzierung.....	320
Verbrauchssimulation	321
Engineering	
Anlage.....	81
mechatronisch.....	51
Simultaneous.....	56, 57, 71, 324
Engineering Change Management	179
Engineering Change Request	179
Engpass	
Problem	47
Enterprise Application Integration	214
Entscheidungsteam	247
Entstehungsprozess	9
Anlagen	22
Produkt.....	48
Entwicklung	249
Produkt.....	56
Definition	48
Rechnerunterstützung.....	2
Stückliste	305
Vernetzung	49
Zeit	
verkürzen.....	55
ER	
Diagramm	103
Modell	102, 103, 176
Ergonomie	43, 300
Modell	118, 125, 126
Simulation	245
Definition	124
Untersuchung	43, 126
Erkenntnisgewinnung	143
ERP	197, 421
System	89, 197
Expertensystem.....	154
Eye-Tracking-System	96
 F	
Fabrik	
3D-Model	352

Sachverzeichnis

Ausrüstung	273
Betrieb	66, 132
digitaler Betrieb	13, 78
DMU	14, 34, 257, 270, 272, 421
Ablauf	272
flexibel	61
Gebäude	33
Gesamtmodell	270
Konzept	61
Layout	269
Software	207
Lebenszyklus	376
menschenleer	7
mobil	61
Modell	
3D Visualisierung	34
virtuell	351
Modellierung	263
Planung	268, 342
Interationszyklus	272
Prozess	260
Simulation	129
smart	25
Struktur	30, 421
wandlungsfähig	30
Fabrikplanung	27, 28, 421
Architektur	207
CAD-gestützt	4
CAD-System	5
Datenaustausch	207
Definition	28
Handbuch	31
mobile Endgeräte	358
partizipativ	31
Planungsablauf	29
Planungsprozess	29
Planungssystematik	28
Prozess	30
rechnergestützt	4, 428
Software	207
Softwarerestruktur	5
Stahlbau	207
Fabrikplanungs- und Informationssystem	4
Fabrikplanungsprozess	30
Fachfunktion	254
Facility Management	79, 421
Fahrzeugendmontage	297
Fahrzeugprojekt	157

FAPLIS.....	4
Fehler	
Entdeckung.....	57
Planung.....	32, 34, 166
Vermeidung.....	81
Feinplanung.....	288, 309
FEM	39, 40, 42, 118, 119, 422
Benetzungssimulation	293
Definition.....	119
Lackierereiplanung	293
Rechnung.....	40
Schichtdickensimulation.....	293
Tauchprozess.....	293
Wärmedurchdringung.....	293
Wärmeverzug	293
Fertigung	
Anlage.....	76, 287, 297
Auftrag.....	75
Einrichtung	57, 264, 279
Einzelteil	79
Kennzahlen.....	60
Kleinserie	79
Kosten	61, 329
Planer	253
Planung.....	249, 261, 326
Prozess	37, 57, 59, 261, 281, 298, 308
Definition.....	37
Prozesskette	254
Reihenfolge	308
Schritt	281
Steuerung.....	79
modern.....	115
Technologie	54, 252, 329
Einführung.....	253
Verfahren	253
Zeit	56, 60, 238, 301, 307, 338
Reduzierung.....	80
Filetransfer	213
Fluidogramm	137
Flussdiagramm	101
Förder	
Anlage.....	279
Einrichtung	274
Technik	207, 264
Format	
proprietär	202
Freeze-Point	252
Freigabeprozess	311, 312, 314

Sachverzeichnis

Frontloading.....	57, 324, 349, 422
Füge	
Folge.....	67, 289
Plan	287
Prozess	41, 123, 287, 325
Simulation	40, 41
Verfahren	121, 298
Funktion	
Bewertung.....	64

G

Gantt-Chart	124, 137, 138, 141
Gate	252
Gebäude.....	27, 33, 79, 238, 422
Ausrüstung.....	351
Definition.....	33
Einrichtung.....	309
Fabrik	33
Planung	32, 33
Definition.....	32
Produktion	32
Simulation	127
Geometriedaten	
3D 34	
Geräuschsimulation	127
Gesamtfabrik	268
Gesamtmodell.....	252, 265
3D 270, 271	
CAD	269, 274
Fabrik	269, 270, 279
virtuell	253
Gestaltungsmethode	
Definition	99
Gestensteuerung	172
Getränkeindustrie	354
Getriebe	282, 295
Gewerk.....	241, 269, 274, 283, 422
Gießprozess	120
Graphentheorie	106, 109
Großprojektionsanlage	236, 353
Groupware Softwarewerkzeuge	155
Groupware-System	155

H

Hallen	
Bezugssystem.....	265

Layout.....	63
System	4
Rasterpunkt	273
Handbuch	
Fabrikplanung.....	31
Hardwareinfrastruktur	232
Head-Mounted Display	147, 168, 169
Herstellkosten	60, 81, 423
HLA	218
HLS	4
Hochfrequenzschweißen.....	253
Hochlauf, Produktion	250, 252
Hochlauf,Produktion	58
 I	
Identifikationstechnik	97
IFC-Spezifikation.....	206
IGES	204, 423
Immersion	145, 169
Inbetriebnahme.....	74, 328
virtuell	15, 17, 76, 226, 326, 327
Arbeitsplatz	328
Industrial Engineering	423
Industrie 4.0	14, 24, 52, 62, 98, 160, 183, 207, 370, 372, 374, 376, 423
Basis	24
Nutzen	52
Wegbereiter	52, 53
Industriebau	260
Industrieroboter	
Hersteller.....	22
Information	173, 174, 423
Informations	
Beschaffung.....	64
Erhebung	89
Fluss.....	247, 275
Modell	176
Modellierung.....	102
Objekt.....	152, 179
Plattform	57
Raum	152
Technik	5
Informationsprozesse	
Referenzmodell	36
Informationsräume	152
Innovationszyklus.....	55
Insellösung	20
Integration	

Sachverzeichnis

Bestrebung	183
direkte Kopplung	181
horizontal	183
indirekte Kopplung	181
Kopplung	181
Modell	181
organisatorisch	187
Plattform	181
Rahmen	186, 187
vertikal	183
vollständig	
Softwarewerkzeuge	180
Werkzeug	181
Integrationsplattform	
XPLM	226
intelligente Produktion	376
Interaktion	163
Interdisziplinäres Team	31
International	
Projektmanagement	157
Internet der Dinge	53, 62, 98, 424
Interoperabilität	180, 184, 424
Modell	190
pragmatisch	
Definition	184
semantisch	
Definition	184
syntaktisch	
Definition	184
Investitions	
Entscheidung	358
Güter	
Logistik	279
Kosten	81, 341
Mittel	329, 335
Projekte	81
Rechnung	325
Vorgabe	314
iPad	62
Ist-Aufnahme	
Gebäude	264
Iterationszyklus, Fabrik-DMU	272
J	
JT	203, 352, 424
Just-In-Sequence	46, 302
Just-In-Time	46, 302, 424

K

Kapazitätsplanung	196, 285
Karosseriebau	282, 286
Anlage	290
Kinematiksimulation	289
PKW	325
Planung	286
Käufermarkt	1
Kenntnisvermittlung	143
Kernteam	248, 251
Key-User	240
Kinematik	
Anlage	327
Modell	118
Simulation	122, 124
Klebeverbindung	41
Kleinserienfertigung	79
KMU	24, 235, 340, 424
KNN	
Definition	133
Kollaboration	151, 163
Kommunikation	151
Kooperation	151
Koordination	151
Werkzeug	311
Kollision	32, 34, 166, 272
Prüfung	271, 296
Kombination	
Realität und Virtualität	365
Kommunikation	62, 78, 241
asynchron	152
Echtzeit	25
Plattform	31, 57, 66, 254, 343
synchron	152
System	153
Kommunikationsmittel	
IT-gestützt	152
natürlich	152
technisch	152
Kommunikationsplattform	31, 45
Kompetenzplanung	243
Kompressionsalgorithmus	201
Konfigurationsmanagement	178, 179
Konstruktion	3, 249
Zeichnung	105
Konvertierung	
Aufwand	75

Sachverzeichnis

Konzept	
Lösung	
integrativ	218
Phase	234, 239, 314
Planung	309
Kooperation	
Mensch-Roboter	40
Kosten	
Änderung	16
Beeinflussung	60
Einsparung	80
Kosteneinsparung	82
Künstliche Intelligenz	132
Künstliche Neuronale Netze	133
Kunststoffe	
carbonfaserverstärkt	289
KVP	61

L

Lackier	
Anlage	295
Prozess	39
Roboter	291
Trockner	293
Verfahren	120
Lackiererei	
Anlage	295
Aufheizprozess	293
Decklack	291
Planung	290
Tauchlackierung	294
Ladungsträger	47
Lagereinrichtung	279
Laserscangerät	266
Laserscanning	77, 93, 270, 274
Messpunktwolke	93, 266
System	264
Lastenheft	242, 424
Layer	309
Layout	308, 425
absicherung	361
Planung	425
computergestützt	195
Definition	43
VR-gestützt	353
Zeichnung	105
Layoutplanung	

3D.....	45
Lean Factory.....	369, 370, 372
digital.....	369, 373
Lean Manufacturing	7
Lean Philosophie	
Digitale Fabrik.....	371
Kernelemente.....	373
Lean Production	369, 425
Lebenszyklus	248
Kosten	356
Produkt.....	57
Legacy-System.....	216
Lernverfahren	
überwacht	133
unüberwacht	133
Lieferant	272
Lineare Programmierung	107
Linienplan.....	307
Lizenz	
Gebühr	24
Logistik	425
Behälterplanung.....	276
Beschaffung.....	45
Definition.....	46
digitale Planung.....	46
Distribution	46
Investitionsgüter	279
Kette, Planung	302
Planung.....	45, 46, 47, 50, 274, 275
Montage	47
Planungsprozess.....	276
Produktion.....	45, 428
Unternehmen.....	45
Logistikmanagement	
Social Media	47
Logistiksteuerung	
Assistenzsysteme	68
Losgröße.....	425
Lösungskonzept	
integrativ	218

M

Make-or-Buy.....	426
Management	
Änderung.....	310
Behälter.....	50
Produktion	

Sachverzeichnis

Toyota	303
Manufacturing Execution Systems	196
Markov-Prozess	112
Markt, Anforderungen	249
Maschinenanordnungsoptimierung	
rechnergestützt.....	44
Maschinenbau	20, 21
Materialbedarfsplanung	248
Materialfluss	268
Beziehung.....	47
Kette.....	63
Planung	274
Simulation	128, 335
ereignisdiskret.....	128
Visualisierung	353
Maus	
3D.....	167
M-CAD	
System.....	193
MDE	91, 197
Mehrkörper	
Simulation	121
System.....	118, 121
Meilenstein	70, 252
digital	63
Prozess	314
Meilensteintrendanalyse	156
Mengenplanung.....	196
Menschmodell	126
digital	94
Mensch-Roboter-Kooperation	40
MES	197, 426
Messbolzen	265
Messkugel	265
Messpunktwolke	93, 266
Messung	
Projektfortschritt.....	315
vor Ort	89
Meta	
Daten.....	193, 215
Modellierung.....	185
Sprache	
Definition.....	208
Meta-Heuristik	107
Methode	11, 85, 87, 426
Analyse.....	106
Darstellung	99
Definition	86

Gestaltung	99
Planung	106
Projektmanagement	156
Unterstützung	257
Visualisierung	100, 134
Methoden	
Beobachtung	
manuell	91
Methodenklasse	87
Methodik, Modellerweiterung	352
Migration	426
MIP Modell	107
Mitarbeiter	
Aufgaben	255
Pool	252
Rolle	255
Mixed Reality	148, 426
mobile Applikationen	359
Mobile Endgeräte	79, 358
mobiles Endgerät	
TeamPlan	364
Modell	83, 84, 158, 426
3D	156, 167
statisch	139
analytisch	106
Anlagen-Engineering	81
Bildung	160
Subjektivität	160
deskriptiv	100
Differenzierung	158
digital	10
Dokumentation	161
Ergonomie	118
Erweiterung	352
Fabrik	
virtuell	351
Kinematik	118
Klasse	158, 159
Management	161
mechatronisch	227
Nutzung	160
statisch, grafisch	137
Struktur	
Richtlinien	160
Theorie	84
Virtual Reality	146, 165, 357
virtuell	351
VR	156

Sachverzeichnis

Modellierung.....	267, 346
3D.....	193
4D.....	140
Ablauf.....	101
Daten.....	102
Information.....	102
Konvention.....	160
Prozess	101
Modellierungskonvention.....	185
Modul.....	35
Modulares Bauen.....	34
Monitoring	140
Definition	141
Montage.....	40
Ablauf.....	301
Automobilindustrie	297
Band	
Planung	302
Bremsseil.....	43
Logistikplanung	47
Planung	43
Prozess	40
Prozesses.....	299
Simulation	298
Montageband	301
Motion-Capturing	95
Anzug	96
Verfahren	94
Motor.....	295
Multiagentensystem	132
Multimomentaufnahme	91
Multiprojektionsraum.....	155, 164
Musteranlagen.....	72

N

Nachrichtenformat	202
NC.....	198
Netz	
neuronal.....	134
Definition.....	133
Netzplantechnik.....	109, 110
Netzwerk	
Architektur	209
Protokoll.....	213
Noise Vibration Harshness.....	127
Normungsgremium	256
Nutzen	

Bewertung.....	66
Digitale Fabrik.....	56
Industrie 4.0	52
Nutzenbetrachtung	54
Nutzwertanalyse	115

O

Oberflächenbehandlung	39
OBJ	
Format.....	203
Objekt, .NET	351
ODETTE.....	202
Office	
Werkzeug	192
Office-Produkt.....	193
Offline-Programmierung	122, 124, 297, 299, 327
OFTP	202
Ontologie.....	185
Operationsfolgediagramm	101
Optimierung	
dynamisch	108
mathematisch.....	106
Modell	
deterministisch.....	106
stochastisch	107
Prozess	310
Transport.....	108
Verfahren	
einkriteriell	107
multikriteriell.....	107
Ordnung	
Rahmen	
Maßnahmen	188, 190
Organisation.....	229
lernende	232
Struktur	246
neues Grundmodell.....	250
OWAS-Verfahren.....	126

P

Packversuch	49
virtuell	50
Partizipationsteam	248
Partizipative Planung.....	31
PDM	356, 427
System	8, 153, 192

Sachverzeichnis

Definition.....	193
PEP	427
Referenzmodell.....	248
Petrinetz.....	104
Pflege	
Bestandsdaten	19
Pflichtenheft	427
Phasen	
Modell	30
Planung	29
Phasenmodell	30
Pilotprojekt	232, 238, 254
Planer	
Tätigkeitsarten	64
Planung	
3D-CAD.....	346
Absicherung	48
Aggregat.....	296
Aggregatefertigung	295
Ausrüstung	33
Außen nach Innen	261
Behälter.....	276
Betriebsmittel	48
Daten.....	343
Einführung.....	244
eingebettet.....	251
energieeffiziente Produktion	316
Fahrzeugendmontage	297
Fehler	32, 34, 166
Vermeidung.....	81
Fertigung	
Technologie.....	329
Fertigungsprozess	37
Gebäude.....	32, 33
Definition.....	32
Innen nach Außen	261
Kapazität	196
Karosseriebau.....	286
Kollision	272
Kosten	62
Lackiererei.....	290, 291
Lackierprozess.....	39
Layout	
Definition.....	43
Leistungssteigerung	78
Logistik	45, 46, 274
Materialbedarf	248
Methode	106

Montage	40, 43
partizipativ.....	31, 155
partizipative.....	31
Phasen	29
Prinzip.....	29
Produktion.....	35
Definition.....	35
Produktionslayout	43
Produktionsprogramm	109
Produktionsprozess	35
Projekt	344
Prozess	19, 57, 70, 260
Fabrikbau.....	260
konfigurierbar.....	236
Produktoptimierung.....	282
Prozesskette	333
Prozessplanung	39
Rechnerunterstützung.....	64
stufenweise	29
Systematik.....	28
Team.....	243, 272
Technologie.....	255
Teileversorgung	301
Zeit	55, 65, 81, 297, 354
Planungsablauf	
klassisch.....	36
Planungsabläufe	28
Planungsobjekte	
Standardisierung	72
Planungsphasen	29
Planungsprinzip	29
Planungsschritte	
Vorverlegung.....	63
Planungstisch	155, 163, 353
2D.....	32
3D.....	32
Plattform	
.NET	352
3DEXPERIENCE	219, 221
Lösungskonzept	
Teamcenter	223
PLM	219, 427
System	2, 8
Positionsbrille.....	168
PPR-System.....	427
PPS	6
Aachener PPS-Modell	196
System	196

Sachverzeichnis

PPS System.....	89
PQ-Analyse.....	111
Pressenstraße	284, 285
Presswerk.....	283
Presswerkzeuge	284
Primärdaten	89
Prinzip	
Planung	29
Probleme	
Engpass	47
Produktionsplanung	
digital	36
Produkt	
Änderung	
Ursachen	313
Änderungen	61
Bedarf.....	249
Beeinflussung.....	49
Daten, 3D	342
digital	14, 48
Entstehung	
Phase	86
virtuell	192
Entstehungsprozess	48
Entwicklung.....	9, 56
Definition.....	48
fertigungsgerecht	58
Gespräch	298, 299
Lebenszyklus	57
Modell.....	21
digital.....	8
Optimierung	
Planungsprozess.....	282
Qualität	59
Reifegrad.....	48
Reihenfolge	
technisch	307
Stückliste.....	303
Verbesserung	59
Produkt- und Produktionsentstehung	
virtuelle	8
Produktentwicklung	
Prozess	48
Produktgestaltung	
logistikgerecht.....	48
produktionsgerecht.....	49
Produktion	9
Anlauf.....	55

energieeffizient	
Planung.....	316
Entstehung.....	249
Entstehungsprozess.....	11
Flexibilität.....	422
Gebäude	32
Halle	
3D-Modell.....	270
Hochlauf	250, 252
intelligent	376
Kosten	54, 55, 56, 60
Layoutplanung.....	43
Leittechnik.....	78
Logistik	45, 428
Management	
Toyota.....	303
Planung.....	9, 13, 35, 62, 305
Definition.....	35
Programm.....	248, 428
Programmplanung.....	196
Prozess	35, 58, 60
Steuerung.....	196
wertstromorientiert	373
Vernetzung.....	49
virtuell	15, 431
Zelle	38, 254
Produktion der Zukunft.....	52
Produktionsanlagen	
Hochlauf	58
Produktionseinrichtung.....	27
Produktionsleittechnik.....	78
Produktionsplanung und -steuerung.....	6
Produktionsprogramm	
Planung.....	109
Produktionsstandort Deutschland	374
Produktionsstrategien.....	72
Produktionszelle	
virtuell	38
Produktplan.....	307
Produktreihenfolge	
technische	306
Prognose, Sekundärbedarf.....	248
Projekt.....	428
Ablauf	59
Fortschritt	
Messung	315
Leitung	240
Management	

Sachverzeichnis

KMU	341
Organisation.....	239, 251
Planer	256
Planung	247
Qualität	70
Team	239, 247, 254
Zentrum	250
Projekt-Informations-System.....	361
Projektion	
2D.....	165
3D.....	165
dreiseitig.....	166
aktiv-stereo.....	168
passiv-stereo.....	168
stereoskopisch	166, 169
Technik.....	165
Projektionswand	163
Projektmanagement	109, 156
international	157
Methode	156
System.....	199
Prozess	10, 428
Ablauf, Transparenz	312
Absicherung	
virtuell	39
Änderung	7
Fabrikplanung	30
Fertigung	
Definition.....	37
Freigabe	311, 312, 314
Gestaltung.....	36
Integration	325
Kette.....	101
ereignisgesteuert	138
Gesamtmethodik.....	337
Paradigma.....	101
Markov-Prozess.....	112
Meilenstein	314
Modell.....	88, 138
Modellierung.....	101
Muster, digital	253
Optimierung.....	310
Orientierung.....	246
Partner	324
Plan	241, 303, 306, 314
Planung	39
Produktentwicklung	48
Qualität	82

Reife	39, 51
Reifegrad	82
Sicherung.....	51
Simulation ..	254
Unternehmen.....	12
Verbesserung	67
Prozesse	
wertschöpfende	35
Prozesskette.....	333
Bewertung.....	333
Planung.....	333
Prozessmuster	
digital	
Definition.....	37
Prozesswissen	159
Prüfprozess	297
Punktwolke	266, 267

Q

Quadrocopter.....	367
Qualifikationsprofil.....	253
Qualitätssicherung	357
rechnergestützt.....	199

R

Radio Frequency Identification Device.....	97
Rationalisierung	
Routine	67
Rechnergestützt	
Maschinenanordnungsoptimierung	44
Rechnermodell	10
Rechnerunterstützung	2
geschichtliche Entwicklung.....	2
Planung.....	64
Recyclingregeln	80
Reduzierung	
Gesamtaufwand	58
Referenzmodell	267
Informationsprozesse.....	36
Reifegrad	59, 70, 71
Anlage.....	81
Prozess	82
Prüfung.....	314
Reifegradmonitoring	157
Reisezeit	70
Releaseverwaltung	179

Sachverzeichnis

Remoteplanner	245
Rendering, 3D	352
Ressource.....	308, 429
Bibliothek	36
Management.....	246
Struktur	303
Revision	178
RFID	
System.....	97, 98
Roboter	76, 288
Energieoptimierung	323
Karosseriebaufertigung.....	122
Kinematik	288
Offline-Programmierung.....	288, 291
Simulation	123, 288, 291
Steuerung.....	64
System.....	53
Rollback.....	178
Routine	
Rationalisierung	67
Routinetätigkeiten	64
Rücksprung	253
Rüstprozess.....	79

S

SADT.....	101, 102, 138
SADT-Modell	101
Sankeydiagramm	105, 138
Schatten	
digital	13, 52, 83, 420
Schätzverfahren	
statistisch	111
Schichtdicke	39
Schichtdickensimulation	294
Schiffbau	22, 353
Modul.....	22
Simulation	354
Schweißen.....	287
Hochfrequenzschweißen.....	37, 253
Schweißpunkt.....	287
SDX.....	203
Sekundärbedarfsprognose	248
Sekundärdaten.....	89
Semantik	174, 429
Sensorklassifizierung.....	92
Service.....	215
Shutterbrille	169

Sicherung	
Prozess	51
Simulated Annealing	107, 108
Simulation	10, 62, 109, 117, 150, 355, 429
Ablauf	47, 78, 129, 277
Begriff	117
Definition	117
Drapierprozess	289
Elektrotauchlackierung	39
ereignisdiskret	117, 128, 135, 144
Ergonomie	124
Definition	124
Fügen	40, 41
Gebäude	127
Geräusch	127
Gießprozess	120
Heizung	321
Kinematik	122, 285, 289, 297, 299
kontinuierlich	117, 118
Logistik	277
Lüftung	321
Materialfluss	128
ereignisdiskret	128
Modell	88
Modellgenerierung	
teilautomatisiert	47
Monatge	298
numerisch	289
personalorientiert	42, 124
Prozess	254
Roboter	123
Energie	323
Schiffbau	354
Software	
3D	52
Strömung	
numerisch	293
Tauchprozess	292
Tiefziehen	119
verteilt	218
Wärme	127
Weg	279
Werkzeug	195, 218
zeitdiskret	127
zeitgesteuert	117, 127
Simulationsmethoden	117
Simulationsmodell	130, 131
deterministisch	117

Sachverzeichnis

stochastisch.....	117
Simultaneous Engineering	56, 57, 71, 324, 429
Sitzungen	
virtuell	69
Smart Apps	79
Smart Factory.....	15, 24, 77, 376, 429
SOA	214
Definition	215
Social Business Anwendungen	155
Social Media.....	47, 68, 151, 152, 430
Logistikmanagement.....	47
Software	
Werkzeug	22
Klassen	192
Produkt und Produktionsmittelentwicklung	192
Werkzeugklasse.....	173, 192
Softwareagent	
Definition	132
Softwarewerkzeug	
Klassen	192
Softwarewerkzeuge	
vollständige Integration	180
SOP.....	430
Speicherprogrammierbare Steuerung	51
Spezialisten	256
SPS	198
Stahlbau	207, 273
Standardarbeitsplatz.....	73
Standardisierung.....	17, 19, 22
Planungsobjekte.....	72
Statistik	106, 110
deskriptiv.....	110
explorativ	110
induktiv	111
STEP	205, 430
STEP-CDS.....	207
Steuerungssoftware	328
Stichprobe.....	112
Stochastik.....	106, 110
Strömungsmechanik	
numerisch	118
Strömungsmechanik, numerisch.....	358
Struktogramm	105
Struktur	430
Diagramm.....	105
Modellierung.....	105
Strukturmodell.....	100
Strukturplanung	

VR-gestützt	353
Stückliste	
Betriebsmittel	309
Entwicklung	304, 305
logistische	304, 305
stufenweise Planung	29
Subteam	251
Supply Chain	248, 430
Supply Chain Management	219
Synergieeffekt	68
Syntax	173, 430
System	430
Dynamic	72
<i>interoperable</i>	180
kontinuierlich	126
roboterbasiert	53
Vernetzung	52
Systemarchitektur	
technisch	209
Systemintegration	18, 19
Systemoptimierung	
digital	293
Systemwissen	159

T

Tabu Search Verfahren	107
Tachymeter	273
Laserpointer	273
Position	273
Tätigkeitsarten	
Planer	64
Tauchlackierung	294
Tauchprozess	
Simulation	292
Team	
interdisziplinär	31
TeamPlan	352
mobiles Endgerät	364
Technikplan	298
technische Gebäudeausrüstung	207
Technologie	
Auswahl	38
Technologieplanung	255
Teilebedarf	249
Teilefamilien	47
Teileversorgung	
Planung	301

Sachverzeichnis

Terminplanung.....	157, 196
Tesselierung.....	200
Textsystem.....	2
Textverarbeitung	
System.....	2
Tiefziehen.....	119, 329
Time-to-Market.....	17
Tracking	
markierungslos.....	149
Trackingverfahren.....	148
Transponder.....	97
Travelling-Salesman-Problem	107
Trichtermodell	114

U

UML	100, 431
Umrissdarstellung.....	309
Umsetzungsphase.....	235, 245
Umsetzungsstand.....	16
Digitale Fabrik	18
KMU	24
Unified Modeling Language	176
Unternehmen	
Logistik	45
Prozess	12
virtuell.....	15, 432
Unterstützung, extern.....	236
Untersuchung	
kinematische	309

V

Validierung.....	160, 188, 431
Variante	304
Strukturstückliste	304
Variety.....	183
VDABS	207
VDAFS	206
VDAIS	206
Velocity	183
Veracity.....	183
Veränderungsprozess	232
Verbesserung	
Durchlaufzeit.....	60
Produkt	59
Prozess	67
Verifikation	159, 188, 431

Vernetzung	
Digitale Fabrik.....	18
Entwicklung und Produktion	49
flexibel.....	236
technischer Systeme	52
Verschiebung	
Aufwand	57
Versionsverwaltung.....	179
Versorgung	
Endmontage	46
Versorgungsanlagen.....	35
Videokonferenzsystem.....	163
Virtual Reality.....	10, 137, 145, 148, 167, 245, 342, 431
CAVE	166
Definition.....	145
Echtzeitanwendung.....	352
Großprojektion.....	32
Großprojektionsanlage.....	353
Installationen in Deutschland.....	166
Modell	145, 146, 336, 351
Monitoring	369
Nutzung	344
Objekt.....	345
Objektbibliothek.....	345
Plattform	254
Visualisierung	345
Werkzeug	346
virtuell	
Abnahme	64
Absicherung.....	40
Anlagenmodell	245
Begehung.....	145
Eintakten	42
Gesamtmodell.....	253
Inbetriebnahme.....	15, 17, 76, 326, 327
Arbeitsplatz	328
Modell	351
Probelauf.....	76
Produktion	15, 431
Produktionszelle.....	38
Prozessabsicherung.....	39
Sitzung	69
Unternehmen	15, 432
Virtuelle Produktion.....	15, 431
Virtuelles Unternehmen	15, 432
Visualisierung	10
2D.....	130
3D.....	45, 63, 130

Sachverzeichnis

Modell	34
Definition	134
intelligent	47
Werkzeug	195
Visualisierungsmethode.....	100, 134, 136
dynamisch	137, 140
<i>statisch</i>	137
Volume.....	183
Volumenmodell	309
Vorbereitungsphase.....	234, 237
Vorverlegung	
Planungsschritte.....	63
VR Modell	156
VRML.....	205

W

Wahrscheinlichkeitsrechnung.....	110, 111
Walk Through.....	145, 165
Walzprofilieren	331, 432
Wandlungsfähige Fabrik	30
Wandlungsfähigkeit	30
Warenwirtschaftssystem	196
Wärmesimulation	127
Warteprozess	113
Warteschlangentheorie	112
Wartungsarbeiten	79
Web 2.0.....	153
Web Service	217
Wegbereiter	
Industrie 4.0	53
Wegesimulation	279
Werft	
digital	353
Werktraining.....	300
Werkskoordinatensystem	265
Werksmodell.....	263
Werksstrukturdatenbank	432
System.....	4
Werkzeug	85, 87
Integration	212
Klassen	
Einsatz im Fabrikbetrieb	195
Wertschöpfungskette	46
Wertstromdiagramm	101
Wettbewerb	
Verdrängung	1
Whiteboard	

elektronisch.....	163
Wirtschaftlichkeit.....	63, 344
Berechnung	3
Betrachtung.....	56
Rechnung.....	81, 238
Wirtschaftlichkeitsanalyse	116
dynamisch	116
Methode.....	116
statisch	116
Wissen.....	153, 173, 174, 432
explizit	174
implizit.....	174
wichtiges Element	73
Wissensbasis	72, 153
Wissensdatenbanken	
intern.....	65
Wissensmanagement.....	71, 153, 313, 315
Bibliothek	316
Workflow.....	432
Definition.....	154
effektiv	63
Produktionsplanung	155
Referenzmodell	155
Workflowmanagement	18, 19, 152, 154, 185
System	66, 155, 199, 312, 433
Workgroup Computing.....	152, 154, 155

X

X3D (Extensible 3D).....	206, 209
XML	202, 208
XPLM	
Integrationsplattform.....	226
XYZ-Analyse.....	111

Z

Zeitaufnahme	91
Zeiteinsparung	82
Zeitinkrement.....	127
Zieldefinition	238
Zulieferer	22, 230, 313
Automobilindustrie	22
Zustandsautomat	104
Zustandsmodellierung	104
Zwilling	
digital.....	13, 52, 83, 160, 225, 420
Zwischenankunftszeiten.....	112