

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.**The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung	2
1 Anwendungsbereich	3
2 Begriffe	4
3 Grundlagen der Produktentwicklung	11
3.1 Grundlagen zu Systemen und Modellen ..	12
3.2 Grundlagen des Problemlösens	14
4 Modell der Produktentwicklung	23
4.1 Produktentwicklung	24
4.2 Allgemeines Modell der Produktentwicklung	27
4.3 Aktivitäten in Wechselwirkung mit der Produktentwicklung	42
5 Methoden	49
6 Rechnerunterstütztes Vorgehen	50
Schrifttum	53
Benennungsindex englisch – deutsch.....	56

Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope	3
2 Terms and definitions	4
3 Basics of product design	11
3.1 Basics of systems and models.....	12
3.2 Basics of problem-solving	14
4 Model of product design	23
4.1 Product design	24
4.2 The general model of product design.....	27
4.3 Activities in interaction with product design.....	42
5 Methods	49
6 Computer-assisted procedures	50
Bibliography	53
Term index English – German.....	56

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2221.

Einleitung

Die ersten VDI-Richtlinien zu Methoden der Produktentwicklung sind in den 1970er-Jahren erschienen. Sie konnten einen wesentlichen Beitrag zur Harmonisierung damals neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse (siehe [1] für einen historischen Überblick) und zu ihrer Verbreitung in Praxis und Lehre leisten.

Seither haben sich in Praxis, Wissenschaft und Lehre gravierende Änderungen ergeben. Diese betreffen sowohl die Produkte, die sich zunehmend aus mechanischen, elektrischen/elektronischen sowie informationsverarbeitenden Komponenten zusammensetzen und auch Dienstleistungen einschließen können, als auch die Prozesse und Methoden, z.B. durch global verteilte Entwicklungsprozesse und den inzwischen unerlässlichen Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Unterstützung der Produktentwicklung.

Dazu kommen etwa seit 1990 neue Vorschläge aus der Wissenschaft. Genannt seien insbesondere die Axiomatic Design Theory von *Suh* [2], der Function-Behaviour-Structure-Ansatz von *Gero* [3], die Concept-Knowledge-Theory von *Hatchuel* und *Weil* [4], das Entwerfen auf der Basis von Wirkflächenpaaren und Leit-Stützstrukturen nach *Albers* und *Matthiesen* [5], das Münchener Vorgehensmodell von *Lindemann* [6; 7], das eigenschaftsbasierte Entwickeln von *Weber* [8] oder Konzepte, die insbesondere mechatronische Fragestellungen adressieren (z.B. Richtlinie VDI 2206 sowie *Gausemeier* und *Möhringer* [9] für einen Überblick). Es deutet viel darauf hin, dass alle Ansätze nicht nebeneinanderstehen, sondern sich ergänzen, indem

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/2221.

Introduction

The first VDI Standards on methods of product design were published in the 1970s. They were able to make a significant contribution to the harmonisation of what was then new scientific knowledge (see [1] for a historical overview) and its dissemination in practice and teaching.

Serious changes have since taken place in practice, science and teaching. These changes concern the products, which increasingly consist of mechanical, electric/electronic and information processing components and can also include services, as well as the processes and methods, for example due to globally distributed design processes and the by now indispensable use of information and communication technologies to support product design.

Since about 1990, suggestions have been coming from the scientific field too. In particular the Axiomatic Design Theory by *Suh* [2], the Function Behaviour Structure approach by *Gero* [3], the Concept Knowledge Theory by *Hatchuel* and *Weil* [4], design on the basis of active surface pairs and control/support structures according to *Albers* and *Matthiesen* [5], the Munich procedural model by *Lindemann* [6; 7], property-based design by *Weber* [8] or concepts which address mechatronic issues in particular (see for example the standard VDI 2206 as well as *Gausemeier* and *Möhringer* [9] for an overview) are mentioned here. There are a number of indications that all approaches are not separate, instead complementing each other by

sie auf bestimmte Entwicklungsziele oder bestimmte Tätigkeiten im Entwicklungsprozess fokussieren.

Vor diesem Hintergrund hat sich eine grundlegende Überarbeitung und Neugliederung zahlreicher VDI-Richtlinien zu Methoden der Produktentwicklung als unabdingbar erwiesen. Dabei kann eine Richtlinie kein Lehrbuch sein, das alle inzwischen existierenden Ansätze erläutert. Vielmehr wird versucht, das Bewährte in Richtung auf aktuelle Herausforderungen in der Praxis weiterzuentwickeln.

Die aktuellen Richtlinien zu Methoden der Produktentwicklung sind wesentlich stärker prozessorientiert als ihre Vorgänger. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass in der Praxis heute die Beherrschung der Prozesse, die in immer stärkerem Maße fachdisziplin-, unternehmens- und nationenübergreifend sind, als vorrangige Herausforderung gesehen wird.

Der Richtlinienreihe VDI 2221 kommt weiterhin die Rolle einer Kernrichtlinie der Produktentwicklung zu. Im Interesse einer besseren Übertragbarkeit in die Praxis wurde sie in zwei Blätter geteilt:

- Blatt 1 behandelt Grundlagen der methodischen Entwicklung aller Arten von technischen Produkten und Systemen und definiert in einem „Modell der Produktentwicklung“ zentrale Ziele, Aktivitäten und Arbeitsergebnisse, die wegen ihrer generellen Logik und Zweckmäßigkeit zentrale Leitlinien für die interdisziplinäre Anwendung in der Praxis darstellen.
- In Blatt 2 werden exemplarisch Produktentwicklungsprozesse in unterschiedlichen Kontexten (z.B. Branchen, Produktarten, Stückzahlen) erläutert und Zuordnungen der möglichen Aktivitäten zu Prozessphasen in „kontextspezifischen Entwicklungsprozessen“ vorgeschlagen. Die Beispielprozesse sollen Anwendern helfen, das eigene Vorgehen inhaltlich und organisatorisch zu reflektieren und gegebenenfalls anzupassen.

1 Anwendungsbereich

Die Grundlagen und Vorgehensweisen dieser Richtlinie können auf alle Arten technischer Produkte und Systeme sowie die entsprechenden interdisziplinären Entwicklungs- und Entstehungsprozesse angewendet werden.

Für Sonderaspekte und Details der methodischen Produktentwicklung und Lösungsfindung gelten gegebenenfalls zusätzliche Richtlinien wie VDI 2222, VDI 2223 oder VDI 2206.

focusing on certain design objectives or certain activities in the design process.

Against this backdrop, a fundamental revision and restructuring of numerous VDI Standards dealing with methods of product design has proved indispensable. However, a standard cannot be a textbook, which explains all approaches now available. Instead, it can only attempt to subject tried-and-tested elements to further development in order to meet current practical challenges.

The current standards dealing with methods of product design are much more process-oriented than their predecessors were. This is because current practice sees the principal challenge in the mastery of the processes, which are becoming increasingly independent of specialist disciplines, companies and nations.

The series of standards VDI 2221 goes on playing the role of a core standard for product design. It was divided into two parts to make it easier to put into practice:

- Part 1 deals with basics of the methodical design of all types of technical products and systems. In a “model of product design”, it defines central objectives, activities and work results whose general logic and usefulness make them central guidelines for interdisciplinary use in practice.
- Part 2 explains selected examples of product design processes in various contexts (such as sectors, product types and piece numbers) and suggests assignments of the possible activities to process phases in “context-specific design processes”. The purpose of the examples is to help users to reflect upon their own procedure in terms of content and organisation and adjust it if necessary.

1 Scope

The fundamentals and procedures described in this standard can be applied to all types of technical products and systems and the relevant interdisciplinary design and creation processes.

Additional standards such as VDI 2222, VDI 2223, or VDI 2206 apply for special aspects and details of methodical product design and solution-finding.

Die Zielgruppen dieser Richtlinie sind:

- Prozessverantwortliche und Leiter von Entwicklungsprojekten
- Produktentwickler, Produktmanager und Prozessbeteiligte
- Hochschullehrer und Studierende

2 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinienreihe gelten die folgenden Begriffe:

Absicherung (Eigenschaftsabsicherung)

Bestandteil der Qualitätssicherung, der die beiden Aspekte →Verifikation und →Validierung umfasst [in Anlehnung an VDI 2206]

Anmerkung: Die Qualitätssicherung dient allgemein dem Nachweis der Erfüllung vorgegebener Anforderungen, der präventiven Vermeidung von Mängeln und der Sicherstellung einer Prozessqualität, wobei sowohl die →Methoden wie die begleitenden Prozesse berücksichtigt werden. Unter der Qualität wird nach DIN EN ISO 8402 die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen, definiert. [VDI 2206]

Analyse

systematisches Untersuchen einer Ausgangslage/Istsituation oder von (Zwischen-)Ergebnissen [in Anlehnung an [10]]

Änderungsmanagement

Organisation, Verwaltung und Abwicklung von Änderungsanträgen während des Projektablaufs [in Anlehnung an DIN 69901-5, 3.6]

Anforderung

Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung, die ein →Produkt, Prozess oder die am Prozess beteiligte Person erfüllen oder besitzen muss, um einen Vertrag, eine Norm, eine →Spezifikation oder andere, formell vorgegebene Dokumente zu erfüllen [DIN 69901-5, 3.7]

Architektur

grundlegendes Konzept, Eigenschaften eines Systems oder allgemein die fundamentale Struktur eines Systems [in Anlehnung an [11; 12]]

Anmerkung: Architekturen können aus unterschiedlichen Sichten und mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad erstellt werden (vergleiche funktionale-, logische- und physische Architektur).

Aufgabe

mit bekannten Mitteln erreichbare Zielsetzung [in Anlehnung an [13]]

Baukasten

Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller →Funktionen konfigurieren zu können [in Anlehnung an [14]]

The target groups of this standard are:

- those in charge of processes and leaders of development projects
- product designers, product managers and participants in the process
- teachers and students at universities

2 Terms and definitions

For the purposes of this series of standards, the following terms and definitions apply:

assurance (property assurance)

component of quality assurance which comprises the two aspects →verification and →validation [adapted from VDI 2206]

Note: The objective of quality assurance is generally to prove that certain specified requirements have been met, defects have been prevented and the process quality has been assured. This applies to methods as well as the processes accompanying them. According to DIN EN ISO 8402, quality is defined as the totality of characteristics of a unit in terms of their suitability to meet certain predefined requirements.
[adapted from VDI 2206]

analysis

systematic examination of an initial/actual situation or of (intermediate) results

[adapted from [10]]

change management

organisation, administration, and execution of change proposals in the course of a project [adapted from DIN 69901-5, 3.6]

requirement

condition, ability or service which a product, a process or a person involved in the process has to fulfil or possess in order to fulfil a contract, a standard, a →specification or other formally prescribed documents [adapted from DIN 69901-5, 3.7]

architecture

basic concept, basic properties of a system or in general the fundamental structure of a system [adapted from [11; 12]]

Note: Architectures can be created from differing viewpoints and with differing degrees of abstraction (see also functional, logical and physical architecture).

task

objective which can be achieved using known means [adapted from [13]]

modular system

set of all technical subsystems which follow the relevant set of rules with the aim of being able to use these subsystems to configure technical systems, each possessing a differing amount of all →functions [adapted from [14]]

Baureihe

Anzahl technischer Systeme, die eine ähnliche Produktarchitektur aufweisen [in Anlehnung an [14]]

Anmerkung: Die jeweiligen technischen Systeme unterscheiden sich dabei durch die Ausprägung einzelner Attribute, die durch Skalieren variiert werden.

Bewertungskriterium

Merkmal eines Systems, das hinsichtlich seiner Ausprägungen bei unterschiedlichen Lösungsideen/Lösungsalternativen im Rahmen einer Vorauswahl/Bewertung untersucht wird [in Anlehnung an [6]]

Black Box

Abbildung einer grundlegenden →Funktion oder des wesentlichen Zwecks eines Systems und seiner Interaktion mit der Umwelt, ohne dabei den inneren Aufbau des Systems zu betrachten
[in Anlehnung an [15]]

Anmerkung: Durch diese Abstraktion lässt sich die →Komplexität eines Sachverhalts deutlich reduzieren.

Concurrent Engineering

Aufteilen und überlappendes Bearbeiten von Tätigkeiten [in Anlehnung an [16]]

Anmerkung: Beispielsweise wird eine Automobilkarosserie an vielen Stellen gleichzeitig konstruiert.

cyber-physische Systeme

über eine Kommunikationsschicht (meist das Internet) vernetzte mechatronische Systeme, die im Verbund eine gemeinsame →Funktion erfüllen [in Anlehnung an [7]]

Design for Six Sigma

→Methode des →Qualitätsmanagements, die auf strukturierte Vorgehensweisen und Methodenanwendungen in der →Produktentwicklung abzielt, um durch präventive Maßnahmen fehlerfreie Produkte und Prozesse sicherzustellen [in Anlehnung an [17]]

Design to X/Design for X

Reihe von Gestaltungsrichtlinien für die →Produktentwicklung, zur Verfolgung verschiedener Ziele, z.B. Kosten-, Gewichts- oder Fertigungsziele
[in Anlehnung an [13]]

Effekt

Grundsatz, nach dem ein technisches (physikalisches, chemisches, biologisches, informationstechnisches usw.) Geschehen voraussehbar beschrieben werden kann [in Anlehnung an [6]]

Eigenschaft

aufgrund von Beobachtungen, Messergebnissen, allgemein akzeptierten Aussagen usw. von einem Objekt festgestelltes Ergebnis [in Anlehnung an [18]]

Anmerkung: Eine Eigenschaft, die besonders herausgehoben werden soll, wird als →Merkmal bezeichnet.

series

number of technical systems with a similar product architecture [adapted from [14]]

Note: The technical systems in each case differ as to the manifestations of individual attributes, which are varied by means of scaling.

evaluation criterion

characteristic of a system which is analysed as to its manifestations for solutions/alternative solutions as part of preselection or assessment
[adapted from [6]]

black box

diagram of a basic →function or principal purpose of a system and its interaction with the environment which does not include the internal structure of the system [adapted from [15]]

Note: This abstraction allows the →complexity of a situation to be reduced considerably.

concurrent engineering

subdivision and overlapping handling of activities
[adapted from [16]]

Note: For example, a car body is engineered in many places at the same time.

cyber-physical systems

mechatronic systems networked using a communication layer (usually the internet) which fulfil a joint function when used together [adapted from [7]]

Design for Six Sigma

→method of →quality management that aims at structured procedures and method applications in →product design allowing the use of preventive measures to ensure error-free products and processes [adapted from [17]]

Design to X/Design for X

series of design guidelines for →product design used to pursue various objectives, for example cost, weight or production objectives [adapted from [13]]

effect

principle according to which a technical (physical, chemical, biological, IT, etc.) occurrence can be predictably described [adapted from [6]]

property

result determined for an object due to observations, results, generally accepted statements, etc. [adapted from [18]]

Note: A property, which is to be specially emphasised, is known as a →characteristic.

Emergenz

selbstorganisiertes Entstehen von neuen Eigenschaften oder Zusammenhängen in einem System, infolge des Aufeinanderwirkens der im System vorhandenen Elemente [in Anlehnung an [19]]

Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse

(FMEA)

Methode zur Risikoanalyse von →Produkten und Prozessen [20]

Funktion

allgemeiner und gewollter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine →Aufgabe zu erfüllen [21]

funktionale Architektur

lösungsneutrale Beschreibung rein funktionaler Zusammenhänge eines Systems anhand einer Menge von miteinander zusammenhängenden →Funktionen und Subfunktionen [12]

Funktionsstruktur

Anordnung und meist netzwerkartige Verknüpfung einzelner →Funktionen zu einer oder mehreren komplexen Funktionen (z.B. zur Gesamtfunktion) [in Anlehnung an [22]]

Heuristik

meist auf individuellen Erfahrungen beruhender, bewährter Vorgehensplan zur Lösung von Problemen [in Anlehnung an [18]]

Industriedesign

funktionale und kreative Gestaltung eines industriell hergestellten →Produkts [VDI/VDID 2424]

Anmerkung: Das Industriedesign berücksichtigt neben der technischen Dimension insbesondere die psychologischen, physiologischen und sozialen Bedürfnisse der Nutzer über den gesamten Produktlebenszyklus. Dies sind u.a. Anforderungen zur Bedienbarkeit und der Qualität der Benutzbarkeit sowie zur Sichtbarkeit und Erkennbarkeit.

Innovationsmanagement (IMS)

systematische Planung, Steuerung, Bewertung und Kontrolle der Umsetzung von neuen oder signifikant verbesserten →Produkten (Güter, Dienstleistungen bzw. Prozesse) [in Anlehnung an DIN CEN/TS 16555-1, 3.2]

Iteration

gewollte oder ungewollte Wiederholung einer Handlung [in Anlehnung an [13]]

Anmerkung: Eine Iteration kann beispielsweise auf das gleiche Problem bei gleicher Eingangssituation bezogen sein.

Konfigurationsmanagement

Managementtätigkeit, die die technische und administrative Leitung des gesamten Produktlebenszyklus, der Konfigurationseinheiten des →Produkts und der produktkonfigurationsbezogenen Angaben über-

emergence

self-organised coming into being of new properties or relationships in a system as a result of the interaction of the elements present there
[adapted from [19]]

failure mode and effects analysis (FMEA)

method used for the risk analysis of →products and processes [adapted from [20]]

function

general and intentional relationship between input and output of a system with the objective of fulfilling a →task [adapted from [21]]

functional architecture

solution-neutral description of purely functional relationships of a system using a set of interconnected →functions and subfunctions
[adapted from [12]]

function structure

arrangement and usually network-type linking of individual →functions to form one or more complex functions (such as the overall function)
[adapted from [22]]

heuristics

proven procedural plan usually based on individual experience which is used for solving problems
[adapted from [18]]

industrial design

functional and creative development of an industrially manufactured →product [VDI/VDID 2424]

Note: Besides the technical dimension, industrial design takes in particular the psychological, physiological and social needs of the users throughout the entire product lifecycle into account. These include requirements for operability and the qualities of usefulness, visibility and recognisability.

innovation management (IMS)

systematic planning, control, assessment and monitoring of the implementation of new or significantly improved →products (goods, services or processes) [adapted from DIN CEN/TS 16555-1, 3.2]

iteration

deliberate or accidental repetition of an action
[adapted from [13]]

Note: An iteration can for example refer to the same problem in the same input situation.

configuration management

management activity which takes care of the technical and administrative management of the entire product lifecycle, the configuration units of the →product and the specifications relevant for the

nimmt [in Anlehnung an ISO/IEC/IEEE 16326]

Kostenmanagement

Managementprozess, in dem insbesondere die Kosten in einem Unternehmen analysiert und zielgerichtet beeinflusst werden

Lastenheft

Dokumentation der vom Auftraggeber festgelegten Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines (Projekt-)Auftrags

Anmerkung: siehe DIN 69901-5; VDI 2519 Blatt 1

Lean Product Development

Ausrichtung der Aktivitäten in der →Produktentwicklung auf →Prinzipien wie die Fokussierung auf den Kundennutzen und die Verbesserung des Wertstroms durch die Vermeidung von Verschwendungen

Lösungsprinzip

grundsätzliche Umsetzung einer →Funktion oder mehrerer verknüpfter Funktionen durch Auswahl von Effekten oder →Wirkprinzipien

[in Anlehnung an [22]]

Merkmal

Charakteristikum eines Systems, das durch seine Ausprägung als Eigenschaft wahrgenommen wird [in Anlehnung an [13]]

Metakognition

Reflektieren der eigenen kognitiven Prozesse, somit ein „Nachdenken über das Denken“ [in Anlehnung an [15]]

Methode

planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels [in Anlehnung an [18]]

Modell

vereinfachtes, abstrahiertes Gebilde, das Analogien zu einem Objekt aufweist [in Anlehnung an [18]]

Anmerkung: Modelle sind zweckorientiert und trennen das für die jeweilige Problematik Wesentliche vom Unwesentlichen. Damit können aus dem Verhalten des Modells Rückschlüsse auf das Objekt gezogen werden.

Modul

Subsystem eines Produkts [in Anlehnung an [14]]

Anmerkung: Es wird entweder von Modulen gesprochen, wenn die Subsysteme zeitlich oder organisatorisch verteilt entwickelt werden (siehe Abschnitt 4.2.2), oder auch, wenn zur Variantenbildung (siehe Abschnitt 4.3.2) ein Subsystem durch ein oder verschiedene andere technische Subsysteme ersetzt sein soll, sodass damit die Menge aller →Funktionen oder →Attribute des technischen Systems variiert werden kann.

product configuration involved
[adapted from ISO/IEC/IEEE 16326]

cost management

management process in which in particular the costs in a company are analysed and influenced in a targeted way

functional specification

documentation of the totality of demands made on the deliveries and services of a contractor within a (project) assignment and specified by the customer

Note: see DIN 69901-5; VDI 2519 Part 1

lean product development

orientation of activities in →product design towards →principles such as a focus on the customer benefit and the improvement of the effective stream by avoiding waste

solution principle

fundamental implementation of a →function or of several linked functions executed by selecting effects or →effective principles

[adapted from [22]]

characteristic

feature of a system whose manifestation causes it to be perceived as a property [adapted from [13]]

metacognition

reflection upon one's own cognitive processes and thus “thinking about thinking” [adapted from [15]]

method

systematic procedure in a sequence of activities aiming at achieving a certain objective
[adapted from [18]]

model

simplified, abstract entity that shows analogies to an object [adapted from [18]]

Note: Models are purpose-oriented and separate what is important from what is unimportant for the problem in each case. As a result, consequences for the object can be inferred from the behaviour of the model.

module

subsystem of a product [adapted from [14]]

Note: We speak of modules either when the subsystems are designed in a distributed way with regard to time or organisation (see Section 4.2.2), or when, for the purpose of variant formation (see Section 4.3.2), a subsystem is to be replaceable by one or more other technical subsystems, so that the number of all →functions or →attributes of the technical system can be varied.

morphologischer Kasten

Ordnungsschema zur systematischen Kombination von Wirk- und →Lösungsprinzipien [in Anlehnung an [21]]

Pflichtenheft

Dokumentation der vom Auftragnehmer erarbeiteten Realisierungsvorgaben auf Basis des vom Auftraggeber vorgegebenen →Lastenhefts

Anmerkung: siehe DIN 69901-5; VDI 2519 Blatt 1

physische Produktarchitektur

Gesamtheit der →Module oder Lösungsbausteine, aus denen das →Produkt/System besteht
[in Anlehnung an [12]]

Plattform

Menge von Subsystemen, die in unterschiedlichen technischen Systemen unverändert zum Einsatz kommen [in Anlehnung an [14]]

Prinzip

allgemeine Strategie oder allgemeiner Grundsatz, der das Handeln im Entwicklungsprozess prägt
[in Anlehnung an [6]]

Anmerkung: Verhaltensweisen, die als elementare Gestaltungselemente des Vorgehens dienen; finden sich in vielen →Methoden wieder und prägen dadurch ihre Wirkungsweise.

Problem

Aufgabe oder Fragestellung, deren Lösung nicht offensichtlich ist und auch nicht direkt mit bekannten Mitteln angegeben werden kann

[in Anlehnung an [18]]

Produkt

Erzeugnis oder Leistung materieller wie immaterieller Art, das oder die allein oder als System angeboten wird, um den Bedarf am Markt sowie die Bedürfnisse von Nutzern zielgruppengerecht zu befriedigen [in Anlehnung an VDI 4520 Blatt 1]

Produktdokumentation

Gesamtheit aller relevanten Dokumente, die in oder aus einem Produktentwicklungsprojekt entstehen, Verwendung und Anwendung finden oder anderen Bezug zum Projekt haben

[in Anlehnung an DIN 69901-5, 3.55]

Produktentstehung

Teil des Produktlebenszyklus, der die Phasen „Produktplanung“, „Produktentwicklung“ und „Produktionseinführung“ umfasst

Produktentwicklung

interdisziplinärer Unternehmensprozess zur Entwicklung eines marktfähigen Produkts, basierend auf der Definition initialer Ziele und Anforderungen an das Produkt, die im Lauf des Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt und iterativ angepasst werden

morphological box

scheme for the systematic combination of effective principles and solution principles [adapted from [21]]

technical specification

documentation of the implementation specifications elaborated by the contractor on the basis of the →functional specification compiled by the customer

Note: see DIN 69901-5; VDI 2519 Part 1

physical product architecture

totality of →modules or solution modules making up the →product/system [adapted from [12]]

platform

set of subsystems used unchanged in differing technical systems [adapted from [14]]

principle

general strategy or principle characterising activity in the design process [adapted from [6]]

Note: Types of behaviour which serve as elementary design elements of the procedure can be found in many →methods, whose mode of functioning they characterise.

problem

task or issue whose solution is not obvious and cannot be directly specified using familiar methods [adapted from [18]]

product

material or immaterial commodity or service which is offered alone or as a system in order to satisfy the need of the market as well as the needs of users in a target-group-oriented way
[adapted from VDI 4520 Part 1]

product documentation

totality of all relevant documents coming into being in or as a result of a product design project and are used and applied or have a different connection to the project [adapted from DIN 69901-5, 3.55]

product creation

part of the product lifecycle consisting of the phases “product planning”, “product design”, and “production introduction”

product design

interdisciplinary corporate process used to design a marketable product, the process is based on the definition of initial objectives and requirements for the product which are constantly further improved and iteratively adjusted in the course of the process

Anmerkung: Die Phase der Produktentwicklung schließt die Konstruktion mit ein. Oft werden die Begriffe Produktentwicklung und Konstruktion synonym verwendet. Im Rahmen dieser Richtlinie wird jedoch einheitlich der Begriff „Produktentwicklung“ verwendet.

Produktplanung

Gestaltung des Angebots eines Unternehmens, abhängig von den Zielmärkten und den dort erzielbaren Renditen und Marktführerschaften [in Anlehnung an [16]]

Anmerkung: Die Produktplanung besteht aus den Phasen „Forschung“, „Erstellen des Produktpportfolios“ und „Marketing“.

Produkt-Service-System

System, das integrativ aus einem physischen →Produkt und einem dazugehörigen Dienst besteht [in Anlehnung an [7]]

Produktwertstrom

auftragsbezogener Teilwertstrom im Konzept des →Lean Product Development
[in Anlehnung an [23]]

Prozessmanagement

Identifikation, Gestaltung, Dokumentation, Implementierung, Steuerung und Verbesserung von Geschäftsprozessen [in Anlehnung an [24]]

Qualitätsmanagement

aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation mit dem Ziel einer maximalen Produkt- und Prozessqualität [in Anlehnung an DIN EN ISO 9000]

Simultaneous Engineering

paralleles Bearbeiten unterschiedlicher Aufgaben mit kontinuierlicher Abstimmung des Fortschritts [in Anlehnung an [16]]

Anmerkung: Beispielsweise kann die Planung der Herstellprozesse in der Prozessplanung leicht zeitversetzt, aber fast parallel zur →Produktentwicklung erfolgen.

soziotechnisches System

System, das aus technischen und sozialen Bestandteilen besteht [in Anlehnung an [19]]

Beispiel: Bedienpersonal, das ein technisches Gerät nutzt

Spezifikation

formale Beschreibung eines Systems mit dem Ziel, →Merkmale zu definieren und zu quantifizieren, mit denen das →Produkt des Auftragnehmers bei der Übergabe an den Auftraggeber geprüft und durch den Auftraggeber abgenommen werden kann [in Anlehnung an [6]]

Stakeholder

Person, Gruppe oder Institution, die irgendeine Art von Beziehung zum oder ein Interesse am Verlauf oder Ergebnis eines Prozesses oder Projekts hat [in Anlehnung an [12]]

Note: The product design phase includes engineering. The terms “product design” and “engineering” are often used interchangeably. In the context of this standard, however, the term “product design” is used throughout.

product planning

development of the range of a company depending on the target markets and the yields and market leaderships achievable there [adapted from [16]]

Note: Product planning consists of the phases “research”, “product portfolio creation”, and “marketing”.

product service system

system consisting of a physical →product and an integrated associated service
[adapted from [7]]

product value stream

an order-specific partial effective stream belonging to the concept of →lean product development [adapted from [23]]

process management

identification, design, documentation, implementation, control and improvement of business processes [adapted from [24]]

quality management

coordinated activities for leading and guiding an organisation with the objective of achieving maximum product and process quality [adapted from DIN EN ISO 9000]

simultaneous engineering

parallel processing of different tasks with constant adjustment of the progress made
[adapted from [16]]

Note: For example, the planning of the manufacturing processes within process planning can be carried out with a slight time delay, but virtually in parallel with →product design.

sociotechnical system

system consisting of technical and social components [adapted from [19]]

Example: operating personnel using a technical device

specification

formal description of a system with the objective of defining and quantifying →characteristics allowing the →product of the contractor to be tested and accepted by the customer when handed over to him [adapted from [6]]

stakeholder

person, group or institution with some kind of relationship to, or interest in, the course or result of a process or project [adapted from [12]]

Synthese

Ausarbeitung und Darstellung von Lösungsalternativen für ein gesetztes Ziel auf Basis einer →Analyse [in Anlehnung an [10]]

***SysML* (Systems Modeling Language)**

standardisierte Programmiersprache auf UML2-Basis zur grafischen Modellierung von technischen Systemen

Systemarchitektur

grundlegender Aufbau und Strukturierung eines technischen Systems über verschiedene Konkretisierungsstufen hinweg, also die Funktionsstruktur, die Wirkstruktur, die Baustruktur und deren Verknüpfungen [in Anlehnung an [13]]

Systemdenken

Denken in funktionalen, strukturalen und hierarchischen Zusammenhängen und/oder →Modellen [in Anlehnung an [19]]

***Systems Engineering* (SE, Systemtechnik)**

interdisziplinärer Ansatz, um komplexe technische Produkte/Systeme in großen Projekten zu entwickeln und zu realisieren [in Anlehnung an [11]]

Anmerkung: Systems Engineering konzentriert sich darauf, den Kundenbedarf und eine erforderliche Funktionalität früh im Laufe der Entwicklung zu definieren, Anforderungen zu dokumentieren und dann mit Designsynthese und Designbestätigung unter Berücksichtigung des vollständigen →Problems fortzufahren: Anwendung, Kosten und Zeitplan, Leistung, Schulung und Unterstützung, Nachweis, Produktion und Entsorgung. Systems Engineering berücksichtigt sowohl den wirtschaftlichen als auch den technischen Bedarf aller Kunden mit dem Ziel, ein Qualitätszeugnis bereitzustellen, das den Benutzerbedarf deckt.

Systemtheorie

interdisziplinärer Wissenschaftsansatz, der sich mit den grundlegenden Aspekten und →Prinzipien von Systemen befasst [in Anlehnung an [19]]

***UML* (Unified Modeling Language)**

standardisierte Sprache zur grafischen Modellierung von Softwaresystemen [in Anlehnung an [12]]

Validierung

Prüfung, inwieweit die Testresultate tatsächlich das darstellen, was durch den Test bestimmt werden soll [in Anlehnung an [25]]

Anmerkung: Auf technische Systeme übertragen, ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das →Produkt bezogen auf seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier gehen die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Umgangssprachlich ist Validierung die Beantwortung der Frage: „Wird das richtige Produkt entwickelt?“

Variantenmanagement

aktives und übergreifendes Gestalten der Produktarchitektur und der variablen technischen Ausprägung von →Produkten oder Produktpolen [in Anlehnung an [26]]

synthesis

elaboration and depiction of solution alternatives for a set goal on the basis of an →analysis [adapted from [10]]

***SysML* (Systems Modeling Language)**

standardised programming language based on UML2 for the graphic modelling of technical systems

systems architecture

fundamental structure and structuring of a technical system across different levels of concretisation, i.e. the functional structure, the effective structure, the building structure and the links between them [adapted from [13]]

systems thinking

thinking in functional, structural and hierarchical contexts and/or →models [adapted from [19]]

***systems engineering* (SE)**

interdisciplinary approach for developing and realising complex technical products/systems in large projects [adapted from [11]]

Note: Systems engineering concentrates on defining the customer requirements and necessary functions at an early stage of development, documenting requirements and then continuing with design synthesis and design confirmation while taking the →problem as a whole into account: application, costs and schedule, service, training and support, verification, production and disposal. Systems engineering takes the economic and technical requirements of all customers into account with the objective of providing a quality product which meets the user requirements.

systems theory

interdisciplinary scientific approach which deals with the fundamental aspects and →principles of systems [adapted from [19]]

***UML* (Unified Modeling Language)**

standardised language for the graphic modeling of software systems [adapted from [12]]

validation

check as to whether the test results really show what is to be determined by the test [adapted from [25]]

Note: In terms of technical systems, this is the check as to whether the →product is suitable for its purpose or achieves the desired value. The expectations of the technical expert and the user are taken into account here. Put simply, validation answers the question: “Is the correct product being designed?”

variant management

active and comprehensive designing of the product architecture and the variable technical manifestations of →products or product portfolios [adapted from [26]]

Verifikation

Nachweis über die Wahrheit von Aussagen [in Anlehnung an [25]]

Anmerkung: Auf technische Systeme übertragen, ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung mit der Spezifikation übereinstimmt. Umgangssprachlich ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: „Wird das Produkt richtig entwickelt?“

Vorgehensmodell

Beschreibung wichtiger Elemente einer Handlungsfolge für bestimmte Situationen oder Zielsetzungen [in Anlehnung an [13]]

Anmerkung: Drei wesentliche Anwendungszwecke sind die Prozessplanung, die Prozessnavigation und die Prozessreflexion.

White Box

detaillierte Betrachtung – im Gegensatz zu einer →Black Box – des inneren Aufbaus eines Systems [in Anlehnung an [19]]

Wirkprinzip

Lösungsprinzip unter Einbeziehung des eingesetzten physikalischen Effekts sowie geometrischer und stofflicher →Merkmale (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff) [in Anlehnung an [23]]

Wirkstruktur

Anordnung und Verknüpfung mehrerer →Wirkprinzipien [in Anlehnung an [18]]

Wissensmanagement

Organisation aller Prozesse, in denen Informationen, Erkenntnisse und Erfahrungen identifiziert, erzeugt, gespeichert, verteilt und angewendet werden [VDI 5610 Blatt 1, Abschnitt 2.3]

Wissenswertstrom

auftragsunabhängiger, wissensbezogener Teilwertstrom im Konzept des →Lean Product Development [in Anlehnung an [52]]

3 Grundlagen der Produktentwicklung

Im Rahmen der Entwicklung eines Produkts müssen Menschen durch ihr Denken und Handeln unterschiedliche Informationen er- und verarbeiten, damit aus einem Bedarf oder einem Auftrag ein funktionsfähiges und herstellbares Produkt entstehen kann. Im Produktentwicklungsprozess müssen somit diese Informationen sowie die zu deren Erstellung und Bearbeitung erforderlichen Ressourcen in einen zweckmäßigen Zusammenhang gebracht werden.

Auch wenn die zu erstellenden Informationen im Detail so unterschiedlich sein können wie die aus einem Entwicklungsprozess hervorgehenden Produkte, so liegen jedem Produktentwicklungsprozess doch zugleich generische Bausteine zugrunde, die sich insbesondere aus den Gebieten der Sys-

verification

evidence of the truth of statements
[adapted from [25]]

Note: In terms of technical systems, this is the check as to whether an implementation corresponds with the specification. Put simply, verification answers the question: “Is the product being designed correctly?”

procedural model

description of important elements of a sequence of actions for certain situations or objectives [adapted from [13]]

Note: Three important purposes of this are process planning, process navigation and process reflection.

white box

in contrast to a →black box, this is a detailed consideration of the internal structure of a system [adapted from [19]]

effective principle

solution principle which includes the physical effect used as well as geometrical and material →characteristics (effective geometry, effective movement and material) [adapted from [23]]

effective structure

arrangement and linking of several →effective principles [adapted from [18]]

knowledge management

organisation of all processes in which information, knowledge and experience are identified, generated, stored, distributed and applied [adapted from VDI 5610 Part 1, Section 2.3]

knowledge value stream

assignment-independent knowledge-specific partial effective value stream within the concept of →lean product development [adapted from [52]]

3 Basics of product design

In the context of designing a product, people have to compile and process differing information in order that a functioning and manufacturable product can arise from a requirement or assignment. In the product design process, therefore, this information and the resources necessary for compiling and processing it shall be put into a useful relationship.

Even though the details of the information to be compiled can differ as much as the products arising from a design process, each product design process is simultaneously based on generic modules resulting in particular from the fields of systems theory, various model representations and the human abili-

temtheorie, aus verschiedenen Modelldarstellungen sowie aus den menschlichen Fähigkeiten des Denkens und Handelns als Individuum und in Gruppen ergeben.

3.1 Grundlagen zu Systemen und Modellen

Die Systemtheorie bzw. das damit verbundene Systemdenken haben sich seit langer Zeit in zahlreichen, sehr unterschiedlichen Fachdisziplinen, z.B. der Technik, Naturwissenschaft, Wirtschaft, Soziologie und der Philosophie, als besonders nützlich erwiesen. Im technischen Bereich stellt die Systemtheorie ebenfalls eine wichtige Grundlage für die Produktentwicklung und das Systems Engineering dar (siehe [10; 11]). Auch wenn die Systemtheorie in unterschiedlichen Fachdisziplinen im Detail verschiedene Ausprägungen erfährt und damit auch zum Teil unterschiedliche Begriffe und Definitionen zum Einsatz kommen, so haben diese im Kern ihrer Definition in der Regel die gleichen Inhalte und Aussagen gemeinsam: Als ein System wird eine von einer Umgebung durch eine gedachte Systemgrenze abgegrenzte Menge von Elementen und zwischen ihnen bestehenden Relationen verstanden, die einen definierten Zweck erfüllen sollen.

Was genau ein System ist und was darin als Elemente und Beziehungen aufgefasst wird, ist im Rahmen der Systemtheorie nicht weiter festgelegt. Diese Festlegung erfolgt abhängig von dem vom Ersteller oder auch vom Betrachter des Systems verfolgten Zweck. So kann ein Produkt beispielsweise als ein System mit darin enthaltenen Bauteilen (Elementen) betrachtet werden. Ebenso kann ein System jedoch auch aus darin enthaltenen Produkten bestehen und somit als ein „System aus Systemen“ betrachtet werden. Dies ist z.B. in Bezug auf die Entwicklung von Produkt-Service-Systemen oder cyber-physicalen Systemen oftmals der Fall.

Zur Beschreibung von Systemen werden häufig drei Grundkonzepte benannt (siehe [19]): Das „Funktionale Konzept“ beschreibt, dass ein System, „von außen“ als Black Box betrachtet, auf einen Input (Eingabe) mit einem (gegebenenfalls zeitverzögerten) Output (Ergebnis) oder einer Zustandsänderung reagiert. Damit das System dies kann, verfügt es gemäß dem „strukturellen Konzept“, als White Box betrachtet, in seinem „Innen“ über definierte Elemente und zwischen ihnen bestehende Beziehungen. Die Elemente können entsprechend dem „hierarchischen Konzept“ selbst auch wieder als Systeme betrachtet werden, womit eine beliebige Gliederungstiefe von Super- über Subsysteme bis hin zu Elementen (Bauteilen, Bau-

ties of thought and action as individuals and as groups.

3.1 Basics of systems and models

For a long time now, systems theory and the systems thinking associated with it have proved especially useful in a wide range of specialist disciplines such as technology, natural science, economy, sociology and philosophy. In the technical field, systems theory is also an important foundation for product design and systems engineering (see [10; 11]). Even if systems theory has many specific manifestations in different specialist disciplines, so that differing terms and definitions are used at times, these all basically have the same contents and statements in common: a system is understood to be a set of elements delimited by an imagined system boundary and the relationships between them which are used to fulfil a defined purpose.

Systems theory does not define exactly what a system is and which components of it are to be considered as elements and relationships. This definition is made regardless of the purpose pursued by the creator or viewer of the system. Thus, a product can for example be considered as a system containing various components (elements). However, a system can also consist of various products and can thus be considered as a “system of systems”. This is for example often the case with regard to the design of product service systems or cyber-physical systems.

Three basic concepts for the description of systems are often named (see [19]): the “functional concept” describes how a system viewed “from the outside” as a black box reacts to an input with a (possibly time-delayed) output or a change of state. For the system to be capable of this, according to the “structural concept” and viewed as a white box, it includes various defined elements on the “inside” as well as the relationships between them. According to the “hierarchical concept”, the elements themselves can also be seen as systems, meaning that any desired level of detail ranging from supersystems and subsystems to individual elements (parts, components or individual commands in a computer program) is possible. Figure 1 illus-

elementen oder einzelnen Befehlen in einem Computerprogramm) möglich ist. Bild 1 verdeutlicht diese drei Grundkonzepte der Systemtheorie.

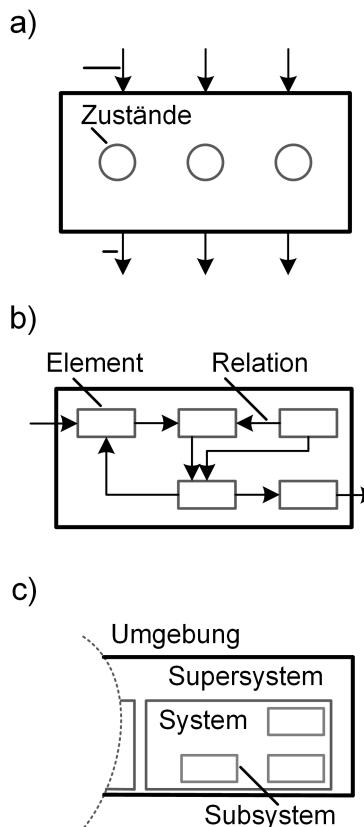


Bild 1. Bestandteile von Systemen
(in Anlehnung an [13])

- a) funktionales Konzept
- b) strukturelles Konzept
- c) hierarchisches Konzept

Sowohl das System selbst als auch dessen Beziehungen und Elemente verfügen über Eigenschaften, mit denen sie unterschieden werden können. Eine große Anzahl unterschiedlicher Elemente und Beziehungen, bzw. deren jeweiligen Eigenschaften, sind zugleich ein Maß für die Komplexität von Systemen. Die Eigenschaften eines ganzen Systems ergeben sich jedoch meist nicht ausschließlich aus den Eigenschaften der einzeln betrachteten Elemente und Beziehungen, sondern erst aus deren Zusammenwirken. Schon *Aristoteles* machte dazu eine Aussage, die in gekürzter Form meist zitiert wird als: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“ Dieser Zusammenhang wird auch als Emergenz bezeichnet und kann dazu führen, dass sowohl erwünschte als auch unerwünschte und damit oftmals unerwartete Eigenschaften eines Systems auftreten.

Bei der Struktur eines Systems aus Elementen und Beziehungen wird insbesondere zwischen den sta-

rates these three basic concepts of systems theory.

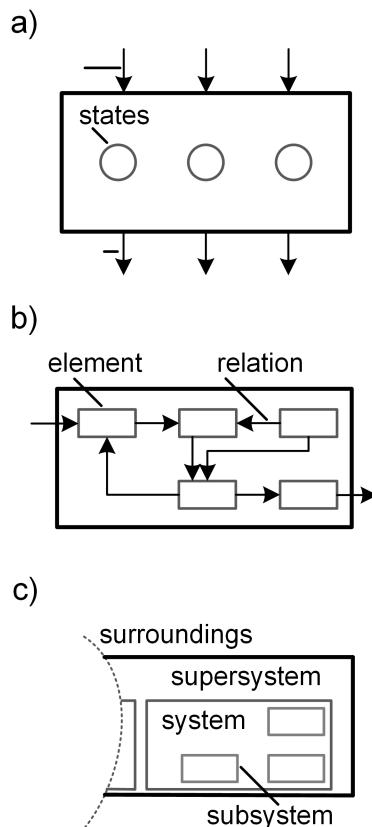


Figure 1. Components of systems
(adapted from [13])

- a) functional concept
- b) structural concept
- c) hierarchical concept

The system itself as well as its relationships and elements have properties allowing them to be distinguished. At the same time, a large number of different elements and relationships (or their properties in each case) are a measure of the complexity of systems. However, the characteristics of an entire system usually do not only result from the characteristics of the elements and relationships viewed in isolation, but only from their interaction. *Aristotle* made a statement on this, which is usually quoted in abbreviated form as follows: “The whole is more than the sum of its parts.” This state of affairs is also known as “emergence” and can lead to the occurrence of desirable as well as undesirable (and therefore often unexpected) characteristics of a system.

With regard to the structure of a system consisting of elements and relationships, a distinction is in

tischen und dynamischen Zusammenhängen unterschieden. Je nachdem, welcher Zweck verfolgt und was als Element eines Systems betrachtet wird, werden dann bei soziotechnischen Systemen mittels den Beziehungen insbesondere Materie, Energie oder Information sowie damit verbundene Operationen (z.B. Speichern, Leiten, Verknüpfen, Umformen und Wandeln) innerhalb von Raum oder Zeit sowie auch beliebige Kombinationen daraus ausgedrückt.

Der Begriff des Systems ist ebenfalls eng mit dem Begriff des Modells verbunden. Jedes Modell verfügt nach einer weitverbreiteten Definition von Stachowiak [27] ebenfalls über drei charakteristische Merkmale. Demnach ist ein Modell immer das Abbild eines Originals (Abbildungsmerkmal) für einen bestimmten Zweck (pragmatisches Merkmal), wobei das Original jedoch nur in reduziertem oder abstrahiertem Umfang (Verkürzungsmerkmal) wiedergegeben wird.

Modelle sind somit mögliche Abbilder von Systemen, sie beschreiben Systeme mittels geeigneter Zeichen [28]. Diese reichen von rein textuellen über grafische sowie matrizenbasierte oder mathematische Beschreibungen bis hin zu realen sowie virtuellen, zweidimensionalen zeichnerischen oder auch dreidimensionalen gestaltorientierten Mitteln. Insbesondere eine Mischung aus Graphen sowie zeichnerischen und textuellen Elementen, wie sie z.B. die standardisierte Modellierungssprache „SysML“ (Systems Modeling Language) bietet, erweist sich für die Beschreibung von Systemen als besonders geeignet. So können die Systemelemente und deren statische und dynamische Zusammenhänge untereinander oder zur Systemumgebung anschaulich beschrieben werden (siehe [11; 12; 29]).

3.2 Grundlagen des Problemlösen

Die Konzepte zu Systemen und Modellen unterstützen insbesondere das Denken und Handeln des Menschen sowie dessen Kommunikation. Untersuchungen zu Denkprozessen haben sich seit einigen Jahrzehnten zu einem umfangreichen Forschungsfeld in der Denkpsychologie (Kognitive Psychologie) sowie in der empirischen Produktentwicklungsforschung entwickelt, die insbesondere das sogenannte „Entwurfsproblemlösen“ (design problem solving) analysieren (siehe [30 bis 32]). Denn bei der Entwicklung von Produkten müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben und insbesondere auch Probleme gelöst werden.

3.2.1 Problemlösezyklus

Zwischen den beiden Begriffen „Problem“ und „Aufgabe“ erfolgt oftmals eine bewusste Abgren-

particular made between static and dynamic relations. Depending on which purpose is pursued and what is considered as an element of a system, sociotechnical systems are described in terms of the relationships between matter, energy or information as well as related operations (such as storing, conducting, linking, converting, and transforming) within time and space as well as any desired combinations of them.

The concept of the system is also closely related to the concept of the model. According to a widespread definition by Stachowiak [27], each model has three typical characteristics. Defined in this way, a model is always a depiction of an original (representational characteristic) for a certain purpose (pragmatic characteristic), but the original is only reproduced to a reduced or abstract extent (reductive characteristic).

Models are therefore possible depictions of systems, which describe them using suitable symbols [28]. These range from purely textual, graphical, matrix-based or mathematical descriptions to real or virtual two-dimensional drawing-based or three-dimensional form-based means. In particular, a mixture of graphs with drawing-based and textual elements proves especially suitable for describing systems. An example of this is the standardised modelling language “SysML” (Systems Modeling Language). This allows the system elements and their static and dynamic relationships with each other or with the system environment to be described graphically (see [11; 12; 29]).

3.2 Basics of problem-solving

The concepts for systems and models support in particular the thought and action of human beings and their intercommunication. In the course of several decades, analyses of thought processes have become an extensive field of research in the psychology of thought (cognitive psychology) and in empirical product design research, which both analyse so-called “design problem-solving” (see [30 to 32]). This is because product design requires a wide range of different tasks, and above all problems, to be solved.

3.2.1 Problem-solving cycle

A deliberate distinction is often made between the two terms “problem” and “task”. This is because a

zung. Denn ein Problem wird meist dadurch charakterisiert, dass es zwischen einem unerwünschten Anfangszustand (Ist) und einem gewünschten Endzustand (Soll) eine Barriere gibt, die es durch eine (gedankliche) Transformation und mittels geeigneter Hilfsmittel (Operatoren) zu überwinden gilt [18; 33]. Im Unterschied zum Problem sind bei einer Aufgabe hingegen der Anfangs- sowie der Endzustand und auch die Hilfsmittel und Transformationsregeln bekannt und eine Barriere besteht somit für den Problemlöser nicht.

Bild 2 verdeutlicht den Aufbau von Problemen und deutet zugleich an, dass Modelle zur Problemlösung bzw. als Hilfsmittel zur Überwindung der Barriere genutzt werden können.

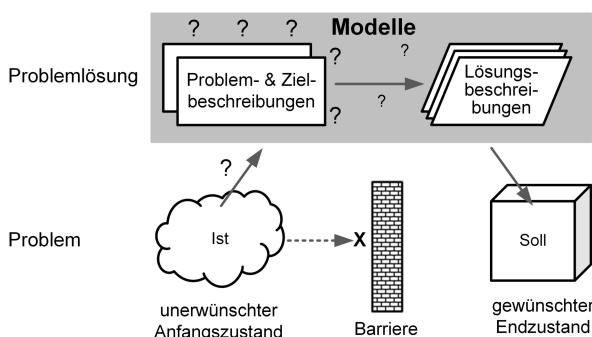


Bild 2. Problem und Problemlösung mit Modellen

Als charakteristische Merkmale von Problemen werden häufig die folgenden vier Punkte der Tabelle 1 angesehen [33; 34], zu denen Empfehlungen zur Verbesserung des Problemlösens gegeben werden können.

Probleme, die alle genannten charakteristischen Merkmale aufweisen, werden meist zugleich als komplexe Probleme bezeichnet. Diese sind für die Produktentwicklung besonders charakteristisch. Beim Lösen komplexer Probleme greift der Mensch aufgrund seiner beschränkten kognitiven Fähigkeiten dann meist auf unterschiedliche Strategien zurück.

Einfache, aber gegebenenfalls auch fehleranfällige Strategien zur Problemlösung werden auch als Heuristiken bezeichnet. Heuristiken entsprechen „Daumenregeln“ und basieren meist auf Erfahrung sowie auf einem Aufspannen und Absuchen des Problemraums nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ oder nach dem Ausschlussverfahren [35; 36]. Andere Strategien zur Problemlösung haben hingegen zum Ziel, schrittweise Vorstellungen oder Beschreibungen zum Problem bzw. zu möglichen Lösungen aufzubauen. Die dazu erforderlichen Schritte können zu allgemeingültigen Problemlöseprozessen zusammengefasst werden.

problem is usually characterised by a barrier between an undesirable initial state (actual) and a desirable final state (target) which is to be overcome by means of a (mental) transformation and using suitable instruments (operators) [18; 33]. In contrast to a problem, a task is characterised by the fact that initial and final state as well as instruments and transformational rules are known, so that there is no barrier for the problem-solver.

Figure 2 illustrates the structure of problems and simultaneously shows that models can be used to solve problems or as instruments for overcoming the barrier.

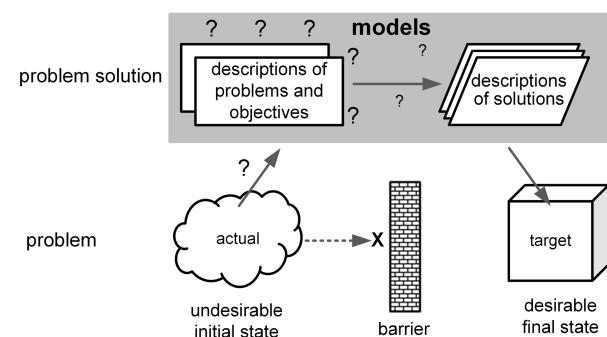


Figure 2. Problems and problem-solving using models

The following four points from Table 1 are considered as characteristic features of problems [33; 34]. Recommendations for improving problem-solving can be given in terms of these points.

Problems, which show all characteristics named, are usually also termed “complex problems”. These are especially characteristic for product design. When solving complex problems, human beings usually resort to different strategies as a result of their limited cognitive abilities.

Simple, but possibly also error-prone, problem-solving strategies are termed “heuristics”. Heuristics are “rules of thumb” which are usually based on experience and the spanning and scanning of the problem space according to the “trial and error” principle or a process of elimination [35; 36]. In contrast, other problem-solving strategies aim at gradually building up ideas or descriptions of the problem or possible solutions. The steps necessary for this can be summarised to form generally accepted problem-solving processes.

Tabelle 1. Problemmerkmale und darauf basierende Empfehlungen

Problemmerkmal: Beschreibung	Empfehlung
Intransparenz: Es liegen nur unvollständige oder unklare Informationen zum Ausgangszustand vor.	Vermeidung von Intransparenz durch die möglichst umfassende Sammlung und Verfügbarkeit von Informationen
Vielzieligkeit (Polytelie): Ein Problem hat nicht nur ein, sondern meist viele Ziele, die sich sowohl ergänzen als auch widersprechen können.	eindeutige Priorisierung von Zielen unter frühzeitiger Berücksichtigung möglicher Zielkonflikte
Vernetztheit: Die Bestandteile des Problems und der Lösung bedingen einander gegenseitig, sodass ein Verändern eines Teils meist auch Auswirkungen auf andere Teile hat.	fortlaufende Erfassung der unter- und zueinander vernetzten Abhängigkeiten von Problem- und Lösungsbestandteilen
(Eigen-)Dynamik: Ein Problem kann sich über die Zeit aufgrund der Bearbeitung des Problems selbst oder auch aufgrund externer Einflüsse verändern.	zeitliche Planung des Vorgehens sowie deren fortlaufende Kontrolle und Aktualisierung bei neuen Erkenntnissen

Im Kern orientieren sich Problemlösungsprozesse häufig an Modellvorstellungen zu Regelzyklen unseres Denkens und Handelns. Beispiel solcher Regelzyklen sind das TOTE-Schema (Test-Operate-Test-Exit) von *Miller*, der VVR-Zyklus (Vergleich-Veränderung-Rückkopplung) von *Hacker* sowie der PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) von *Deming* [6]. In diesen Zyklen werden, ausgehend von einem gesetzten oder gefassten Ziel, durch verschiedene Aktivitäten des Denkens und Handelns Ergebnisse erzeugt (Synthese), wobei bewusst oder teilweise auch unbewusst ein fortlaufender Abgleich der Ergebnisse mit den Zielen erfolgt (Analyse), bis die Lösungssuche aufgrund der zufriedenstellenden Güte des erreichten Ergebnisses oder oft auch aufgrund von zeitlichen Rahmenbedingungen beendet wird. Ein einziges Ziel und eine einzige Aktivität reichen meist nicht aus, um komplexe Probleme zu lösen, deshalb werden sowohl bewusst als auch unbewusst Zwischenergebnisse bzw. Zwischenziele gebildet und ebenfalls gegeneinander abgeglichen.

Bild 3 zeigt einen generischen Regelungszyklus aus Zielen, Aktivitäten der Synthese und Analyse sowie Ergebnissen.

Table 1. Problem characteristics and recommendations based on them

Problem characteristic: Description	Recommendation
Lack of transparency: Only incomplete or unclear information on the initial state is available.	avoidance of lack of transparency due to the comprehensive collection and availability of information
Multi-intentionality (polytelic): A problem usually has not one but many objectives which can complement or contradict each other.	the unambiguous prioritisation of objectives while taking potentially conflicting objectives into account at an early stage
Networking: The components of a problem and of the solution are mutually dependent, so that changing one part usually affects other parts too.	the continuous capture of networked dependencies of problem and solution components
(Inner) dynamics: A problem can itself change over time as a result of the handling of the problem or due to external influences.	the temporal planning of the procedure and its constant monitoring and updating when new knowledge is acquired

Basically, problem-solving processes often follow model concepts which describe control cycles of our thought and activity. Examples of control cycles of this kind are the TOTE (Test-Operate-Test-Exit) model by *Miller*, the CCF (Comparison-Change-Feedback) cycle by *Hacker* as well as the PDCA (Plan-Do-Check-Act) cycle by *Deming* [6]. Starting from a set goal, these cycles generate results by means of various thought processes and activities (synthesis). The results are deliberately or partly deliberately coordinated with the objectives (analysis) until the search for a solution is terminated due to the satisfactory quality of the result achieved, but often also as a result of the expiry of the time allotted. One single objective and one single activity are not usually enough to solve complex problems. For this reason, intentionally or not, intermediate results or intermediate objectives are formed and compared with each other if necessary.

Figure 3 shows a generic control cycle consisting of objectives, activities of synthesis and analysis and results.

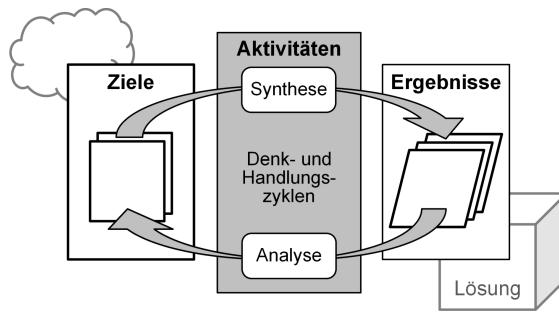


Bild 3. Regelungszyklus zwischen Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen

Basierend auf solchen elementaren Regelungszyklen des menschlichen Denkens und Handelns sowie auf den zuvor benannten Problemcharakteristiken – bzw. den damit zusammenhängenden Empfehlungen – können auch komplexere Problemlösungszyklen beschrieben werden. Ein solcher Problemlösungsprozess enthält dann beispielsweise die Aktivitäten Zielsuche, Lösungssuche und Lösungsauswahl [6; 12; 18; 37].

Diese Aktivitäten können beispielsweise in die in Bild 4 aufgeführten und nachfolgend beschriebenen Aktivitäten weiter detailliert werden:

a) Situationsanalyse

Jede Problemstellung bewirkt zunächst eine Gegenüberstellung mit mehr oder weniger Unbekanntem hinsichtlich der Lösung des Problems. Diese Konfrontation hängt vom Wissens- und Informationsstand des Problemlösers ab. Häufig ist eine über die Eingangsproblemstellung hinausgehende Analyse erforderlich oder hilfreich, bei der zusätzliche Informationen über das Problem selbst sowie dessen Schwerpunkte, Bedingungen und mögliche Lösungswege gewonnen werden.

b) Zielformulierung

Eine anschließende Formulierung und vor allem Präzisierung des zu lösenden Problems bzw. des erwünschten Endzustands erleichtert die Lösungssuche, weil damit der Wesenskern des Problems und die zu beachtenden Bedingungen ohne Vorfixierung auf Lösungen in der Sprache des Problemlösers ausgedrückt werden können.

c) Synthese von Lösungen

Beim Suchen nach Lösungen werden alternative Lösungsideen oder schon konkrete Lösungen oder Teile davon erarbeitet und kombiniert. Wesentlich ist dabei das Entwickeln bzw. Erkennen nicht nur einer Lösung, sondern auch von Lösungsalternativen.

d) Analyse von Lösungen

In einem anschließenden Schritt werden diese Lösungsalternativen dann hinsichtlich ihrer Ei-

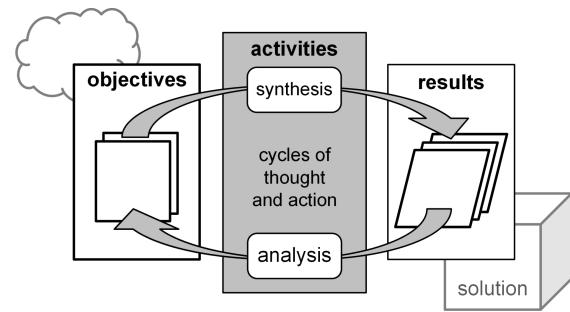


Figure 3. Control cycle between objectives, activities and results

On the basis of elementary control cycles of human thought and action of this kind and of the above problem characteristics – or the recommendations associated with them – it is also possible to describe more complex problem-solving cycles. A problem-solving process of this kind then for example includes the activities “search for the objective”, “search for the solution” and “selection of a solution” [6; 12; 18; 37].

These activities can for example be shown in more detail by splitting them up into the activities listed in Figure 4 and described in the following:

a) analysis of the situation

Each problem first leads to a confrontation with more or less unknown factors affecting the solution of the problem. This confrontation depends on the level of knowledge and information available to the problem-solver. It is often necessary or helpful to conduct an analysis providing additional information on the initial problem itself and its main focuses, conditions and possible solutions.

b) formulation of the objective

The subsequent formulation and above all clarification of the problem to be solved or of the desired final state makes it easier to search for solutions because it allows the essential core of the problem and the requirements which are to be complied with to be expressed in the language of the problem-solver without insisting on certain solutions from the outset.

c) synthesis of the solutions

During the search for solutions, alternative solution concepts or even concrete solutions or parts of them are elaborated and combined. It is crucial here to develop or identify not just one solution, but alternative solutions too.

d) analysis of the solutions

Then, in a subsequent step, these alternative solutions are analysed in terms of their properties

genschaften analysiert, um die für eine Lösungsauswahl erforderlichen Informationen zu gewinnen.

e) Bewertung

Anschließend werden die Eigenschaften der Lösungsalternativen in Bezug auf das Ziel als Grundlage für eine abschließende Entscheidung bewertet.

f) Entscheidung

Abschließend erfolgt die Festlegung auf eine oder mehrere zur Weiterführung geeignete Lösungen sowie deren Umsetzung oder eine Iteration oder der Abbruch des Vorgehens.

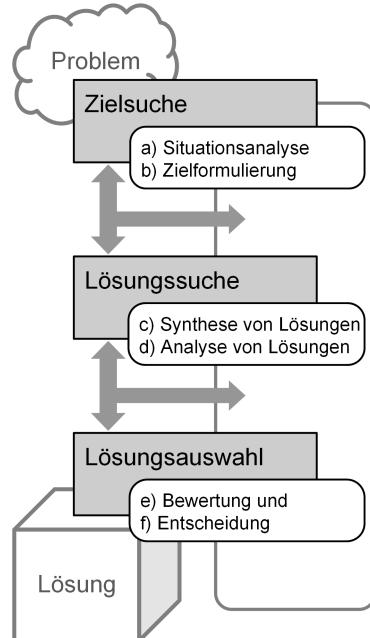


Bild 4. Aktivitäten eines typischen Problem-lösungsprozesses

Mit allen Aktivitäten geht für gewöhnlich auch ein Nachbereiten und Lernen einher, wodurch das Informationsniveau fortlaufend angehoben wird. Dies erfordert die Dokumentation aller gesammelten sowie erstellten Informationen. Durch die kontinuierliche Reflexion des durchlaufenden Problemlösungsprozesses können Erfahrungen ausgewertet und Verbesserungen umgesetzt werden. Damit wird eine Reflexion des Problemlösungsprozesses und gegebenenfalls ein Festhalten von Erkenntnissen für zukünftige Prozesse sowie das Ableiten von Erfolgsrezepten (Best Practices) ermöglicht [38].

Die in Bild 4 enthaltenen Pfeile deuten an, dass eine strikte Abfolge der Aktivitäten natürlich nicht immer gegeben ist. Streng aufeinander folgende Aktivitäten sind oft nur einer übersichtlicheren Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge geschuldet. Die in realen Problemlösungsprozessen stattfindenden Iterationen sind darin meist nur an-

in order to acquire the information necessary for selecting the correct solution.

e) assessment

Then the properties of the alternative solutions with regard to the objective are assessed to provide a basis for a final decision.

f) decision

This is followed by a decision in favour of one or more solutions suitable for further procedure, their implementation or iteration or the abandonment of the procedure.

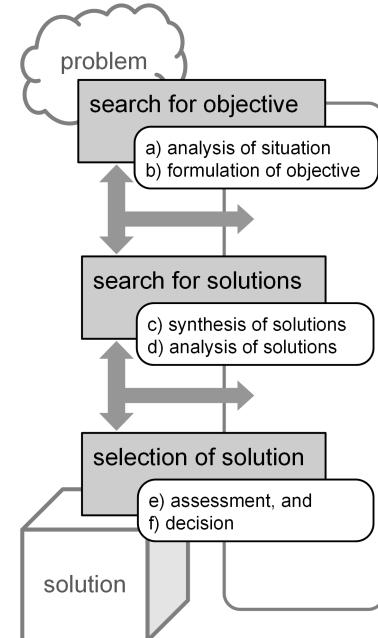


Figure 4. Activities characterising a typical problem-solving process

All activities are usually connected with follow-up effort and learning which allow the level of information to be constantly raised. This requires the documentation of all information collected or compiled. The constant reflection of the problem-solving process passed through allows experiences to be assessed and improvements to be realised. This permits reflection on the problem-solving process and, if necessary, adherence to knowledge for the purposes of future processes as well as the derivation of best practices [38].

The arrows in Figure 4 indicate that the activities do not of course always comply with a certain fixed sequence. Activities are often only displayed as following each other in a fixed sequence in order to display the basic connections more clearly. The iterations taking place in real-life problem-solving processes are usually only sketched in here.

gedeutet. Iterationen und andere Prinzipien werden im nächsten Abschnitt detaillierter beschrieben.

3.2.2 Iterationen und andere Grundprinzipien

Aus Untersuchungen der Denkpsychologie ist unter anderem bekannt, dass es keine streng aufeinander folgenden Vorgehensschritte beim Problemlösen gibt, sondern dass meist nur bewusste oder auch unbewusste Wiederholzyklen zum Erfolg führen. Iterationen sind deshalb als üblich, meist nicht vermeidbar und auch als durchaus wichtig anzusehen. Sie entstehen insbesondere auch aufgrund der unter den Problemmerkmalen angesprochenen (Eigen-)Dynamik des Problems, bzw. der Koevolution von Problem und Lösung. Bei Iterationen können einzelne Aktivitäten oder auch ein kompletter Prozess mehrmals durchlaufen werden. Der Umfang und die Anzahl an Wiederholzyklen sind dabei sowohl abhängig von dem Problem an sich als auch von den persönlichen Kenntnissen, Erfahrungen und Fähigkeiten der Problemlöser. Mit jeder Iteration gewinnt der Problemlöser darüber hinaus an Erfahrung hinzu. Iterationen sollten deshalb immer in Abhängigkeit von dem zu lösenden Problem bzw. dem Lösungsfortschritt entsprechend situationsabhängig und flexibel erfolgen.

In Entwicklungsprozessen können charakteristische Gründe für Iterationen unterschieden werden, von denen einige als Beispiele in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Iterationen erfolgen meist im Rahmen von weiteren Prinzipien des Vorgehens. Dazu zählen beispielsweise das Zerlegen/Zusammenführen, das Abstrahieren/Konkretisieren sowie das Variieren/Einschränken. Weitere Prinzipien finden sich z.B. auch bei „Theorie des erforderlichen Problemlösens (TRIZ)“ [39], siehe auch VDI 4521. Die zuvor genannten drei Grundprinzipien werden häufig auch miteinander kombiniert und können anschaulich in einem Raum auf drei Achsen dargestellt werden [13; 15].

Tabelle 2. Gründe für Iterationen (in Anlehnung an [27])

	Bezeichnung und Erklärung
	Exploration bezeichnet Iterationen, welchen das abwechselnde Erkunden des Problems und der Lösung zugrunde liegt.
	Konvergenz bezeichnet Iterationen, bei denen eine Annäherung an einen gewünschten Zielzustand durch das wechselnde Anpassen verschiedener, sich meist gegenseitig beeinflussender, vernetzter Parameter erfolgt.

Please see the next chapter for a more detailed description of iteration and other principles.

3.2.2 Iteration and other basic principles

One of the results of the psychology of thought is that there are no strictly consecutive procedural steps in problem-solving. Instead, conscious or unconscious repeat cycles are the only way to success. Iterations therefore are to be considered as important, usual and mostly unavoidable. Above all, they also come into being due to the internal dynamic of the problem, which is addressed as one of the characteristics of the problem, i.e. as a result of the co-evolution of problem and solution. In the case of iterations, individual activities or a complete process can be run through several times. The extent and number of repeat cycles depend on the problem itself, one's own knowledge and experience and skill of the problem-solvers. Also, the problem-solver becomes more experienced with each iteration. Iterations should therefore always be seen as a function of the problem to be solved, i.e. they should be performed flexibly depending on the situation in accordance with the progress made towards the solution.

In development processes, we can distinguish between a number of characteristic reasons for iterations. A few examples of these are summed up in Table 2.

Iterations usually take place in the context of other procedural principles. These for example include analysis/synthesis, abstraction/concretisation and variation/restriction. Other principles can for instance be found in the “theory of inventive problem-solving” (TIPS)“ [39]; see also VDI 4521. The above three basic principles are frequently also combined and can be depicted graphically in a space with three axes [13; 15].

Table 2. Reasons for iterations (adapted from [27])

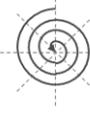
	Designation and explanation
	Exploration is a term used for iterations based on the alternating exploring of problem and solution.
	Convergence is a term used for iterations with which a desirable target state is approached by means of the mutual adjustment of different networked parameters, which usually interact.

Tabelle 2. Gründe für Iterationen (in Anlehnung an [40]) (Fortsetzung)

	Bezeichnung und Erklärung
	Verfeinerung bezeichnet Iterationen, bei denen z. B. eine Optimierung von sekundären Produktmerkmalen (z. B. Ästhetik oder Kosten) verfolgt wird.
	Nachbesserung bezeichnet Iterationen, bei denen auf Fehler in der Lösung oder im Vorgehen reagiert wird oder die aufgrund einer Anpassung an geänderte Randbedingungen erfolgen muss.
	Verhandlung bezeichnet Iterationen, die aufgrund einer Klärung von Konflikten zwischen den Zielen unterschiedlicher Beteiligter erfolgen.
	Repetition bezeichnet Iterationen, welche dieselben Aktivitäten an verschiedenen Stellen im Entwicklungsprozess wiederholen, um damit jedoch unterschiedliche Ziele zu erreichen. Dies unterscheidet sich von anderen Iterationen, bei denen unterschiedliche Aktivitäten zum Erreichen des gleichen Ziels wiederholt werden.

Bild 5 zeigt eine solche Darstellung eines „Vorgehensraums“. Darin sind mit einigen Begriffen die Schritte zum Zerlegen und zur Abstraktion eines Problems oder eines Ziels sowie die Schritte zur Problemlösung angedeutet.

Wie viele und welche Stufen in den drei Dimensionen eines solchen Vorgehensraums erforderlich sind, kann nicht pauschal angegeben werden.

Table 2. Reasons for iterations (adapted from [40]) (continued)

	Designation and explanation
	Refinement is a term used for iterations with which secondary product characteristics (such as aesthetics or cost) are optimised.
	Rectification is a term used for iterations with which the problem-solver reacts to errors in the solution or procedure or which he has to perform in order to adjust to changes in the basic conditions.
	Negotiation is a term used for iterations performed due to the clarification of conflicts between the various parties involved.
	Repetition is a term used for iterations which repeat the same activities at different places in the design process, but in order to achieve different objectives. These are distinct from other iterations which repeat different activities in order to achieve the same objective.

Figure 5 shows a “procedural space” of this kind. It provides a few terms indicating steps used for the analysis or abstraction of a problem or objective and for solving the problem.

It cannot be generally said how many (and precisely which) steps are required in the three dimensions of a procedural space of this kind.

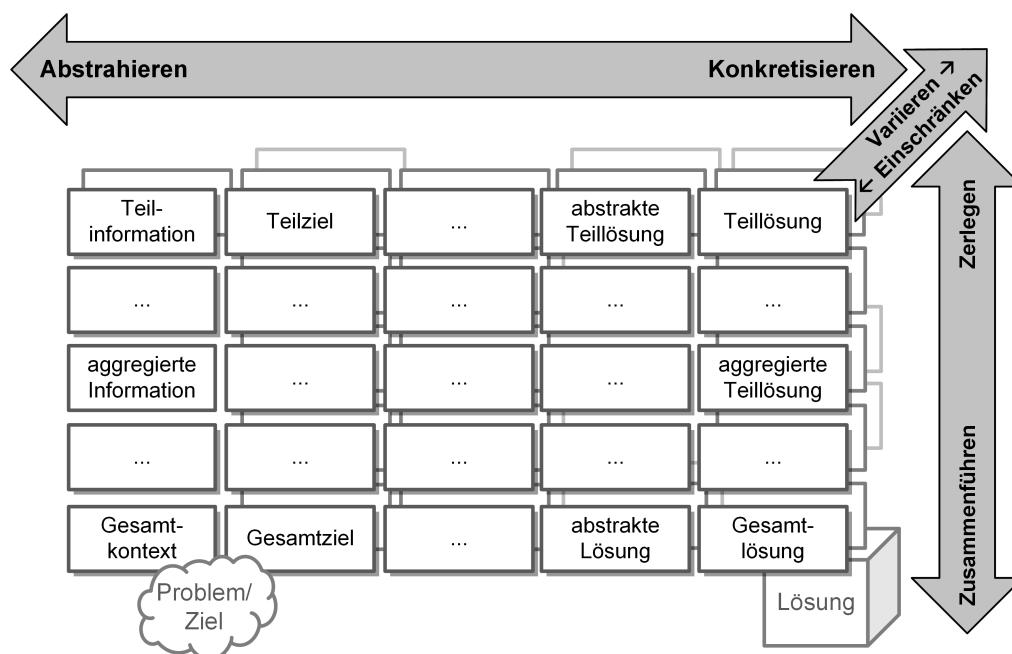


Bild 5. Vorgehensraum mit den drei wichtigsten Grundprinzipien Abstrahieren, Zerlegen und Variieren

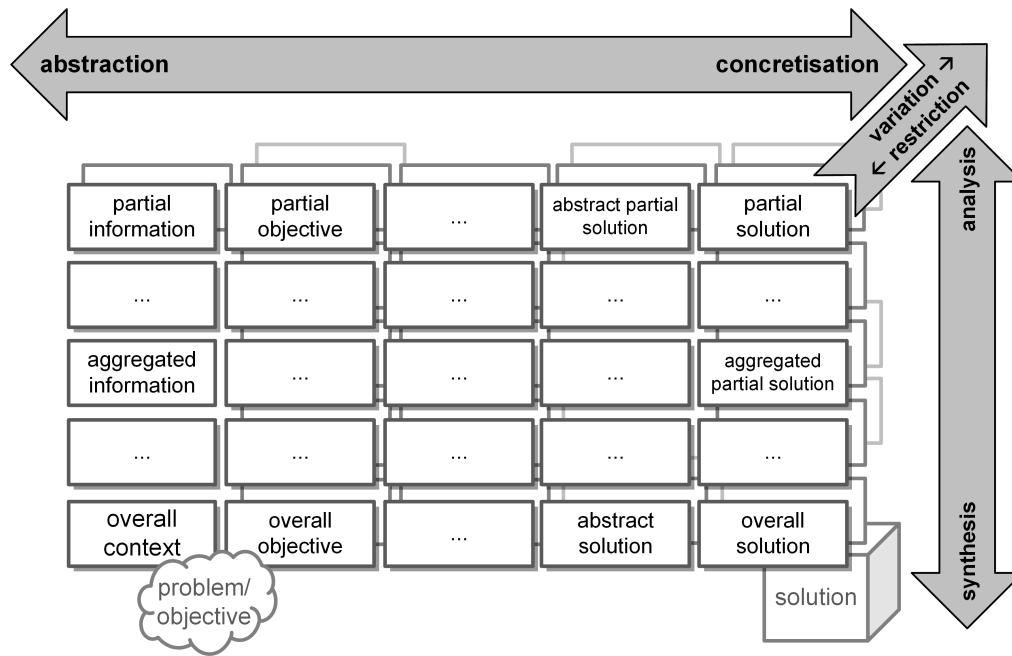


Figure 5. Procedural space with the three main basic principles abstraction, analysis and variation

Ebenso kann auch der Startpunkt eines Problemlösungsprozesses in diesem Raum an verschiedenen Stellen liegen, sodass auf dem Weg zur Gesamtlösung verschiedene, ebenfalls iterative Schritte in allen möglichen Richtungen der Abstraktion/Konkretisierung sowie des Zerlegens/Zusammenführen und des Variierens/Einschränkens möglich sind.

3.2.3 Gute Problemlöser, Kreativität und Teamarbeit

Gute Problemlöser bzw. Entwickler beachten viele der zuvor aufgeführten Zusammenhänge und sind sich meist darüber bewusst bzw. verfügen über eine gute (Selbst-)Reflexion und Metakognition, durch die sie fortlaufend „über ihr eigenes Denken nachdenken“ [41]. Insbesondere wählen gute Problemlöser ein richtiges, an das zu lösende Problem angepasste Maß zwischen Konkretheit und Abstraktion, haben einen Blick für wesentliche Hauptprobleme und beginnen bei diesen mit der Lösungssuche. Sie betreiben auch eine dem Problem angepasste Suche nach Lösungsalternativen und verwenden viel Zeit zur genauen Analyse und Beurteilung von Lösungen. Auch bei auftretenden Schwierigkeiten können sie z. B. durch Umstrukturieren oder Zusammenfassen von Informationen oder durch das Ändern des Arbeitsablaufs handeln, nutzen eine inhaltlich begründbare Strategie zur Ablaufsteuerung des Problemlösungsprozesses und besitzen zugleich ein flexibles Entscheidungsverhalten [18; 34]. Neben gut geordnetem Fachwissen verfügen gute Problemlöser aber auch über ein signifikant besseres Vorstellungsvermögen für

Also, the starting point of a problem-solving process can be found at different places in this space, so that various similarly iterative steps can be performed in all possible directions of abstraction/concretisation, analysis/synthesis and variation/restriction.

3.2.3 Good problem-solvers, creativity, and teamwork

Good problem-solvers or developers take heed of the connections described above and are usually conscious of them or are capable of a good deal of (self-)reflection and metacognition through which they are constantly “thinking about their own thinking” [41]. Above all, good problem-solvers choose the correct combination of concreteness and abstraction to solve the problem in hand, have an eye for essential problems and start looking for a solution there. They also search for alternative solutions in a way that matches the problem, and they spend a lot of time on the precise analysis and assessment of solutions. Even when difficulties occur, they act by restructuring or summarising information or by changing the working procedure and applying a strategy for controlling the procedure used in the problem-solving process, which can be justified in terms of content. They also exhibit flexible decision-making behaviour [18; 34]. Besides well-structured specialist knowledge, however, good problem-solvers also have a significantly better ability to imagine solutions. They have a good knowledge of facts and methods and a

Lösungen. Sie haben gute Fakten- und Methodenkenntnisse sowie eine hohe sogenannte „heuristische Kompetenz“, wozu vor allem das Erkennen von Wichtigkeit und Dringlichkeit und das Planen, Steuern und Kontrollieren der eigenen Arbeit sowie auch die Aktivierung zielgerichteter Kreativität gezählt werden können [18; 36; 37].

Insbesondere Kreativität wird als eine wichtige Grundlage des Problemlösens angesehen. Sie „fängt da an, wo der Verstand aufhört, das Denken zu behindern“ und für jede Phase des Problemlösungsprozesses gibt es eine Vielzahl verschiedener Methoden [42].

Kreativität ist somit nicht nur auf bloße Geistesblitze zurückzuführen, sondern kann gezielt unterstützt, aber damit ebenso auch behindert oder verhindert werden. So wirken sich z.B. die folgenden Dinge positiv auf die Kreativität aus:

- die Fähigkeit zum Erzeugen konkreter Vorstellungsbilder
- das Denken in beziehungsreichen (vernetzten) Systemen
- eine hohe Frustrationstoleranz bezüglich des Umgangs mit Ungelöstem
- ein hohes Kompetenzbewusstsein
- die Bereitschaft zur Denkarbeit beim Problemlösen

Als weitere personenbezogene Kreativitätsmerkmale spielen neben Erfahrung und Wissen auch eine hohe intrinsische Motivation, weit gespannte Interessen, Offenheit, Nonkonformismus (bewusste Grenzüberschreitung, Regelverstöße, unkonventionelles Verhalten), Risikobereitschaft und Flexibilität eine wichtige Rolle [42 bis 44].

Bei einer prozessualen Betrachtung von Kreativität sind ebenfalls die Aktivitäten „Zielsuche“, „Lösungssuche“ und „Lösungsauswahl“ erkennbar. So erfordert Kreativität zunächst ebenfalls eine intensive Analyse der Situation (Präparation). Darauf aufbauend wird dann bei der Lösungssuche durch die Kombination einzelner Aspekte und die Umstrukturierung vorhandenen Wissens – sowohl bewusst als auch unbewusst – eine Vielzahl von Informationen zu neuen Gedanken verknüpft (Inkubation), bis einer der Gedanken dann – zu einem meist ungewissen Zeitpunkt – ins Bewusstsein tritt und zur Einsicht (Illumination) führt.

Dieser Gedanke wird vergleichbar der Lösungsauswahl nach einer Bewertung (Verifikation) schließlich für brauchbar erklärt. Zur Förderung der Kreativität wird jedoch dazu geraten, die Bewertung der Lösung nicht zu früh vorzunehmen [45].

high “heuristic competence”, which above all includes perceiving the importance and urgency of issues as well as planning, controlling and monitoring their own work and activating well-focussed creativity [18; 36; 37].

In particular, creativity is considered as an important basis for solving problems. Creativity “starts when reason stops obstructing thought”, and a wide range of different methods are available for each phase in the problem-solving process [42].

Creativity is therefore not only the result of flashes of inspiration but can be helped on in a targeted way. It can also be obstructed or prevented in the same way, however. The following aspects thus have a positive effect on creativity:

- the ability to conjure up concrete ideas
- thinking in systems rich in connections (networked systems)
- a high frustration tolerance with regard to dealing with unsolved problems
- a high awareness of competence
- a willingness to perform mental work during problem-solving

Other person-specific characteristics of creativity which play an important role besides experience and knowledge are a high intrinsic motivation, a wide range of interests, openness, non-conformism (the deliberate crossing of boundaries, rule violations, unconventional behaviour), a willingness to take risks and a high degree of flexibility [42 to 44].

For the procedural consideration of creativity, the activities “search for the objective”, “search for the solution”, and “selection of a solution” are also visible. First and foremost, therefore, creativity requires an intensive analysis of the situation (preparation). On this basis, in the search for a solution, the combination of individual aspects and the restructuring of existing knowledge – whether intentionally or not – allow a large amount of information to be combined to form new thoughts (incubation), until one of the thoughts – usually at an uncertain point in time – enters one’s consciousness and leads to insight (illumination).

As in the selection of a solution, this thought is finally declared as useful following verification. To promote creativity, however, it is advisable not to assess the solution at too early a date [45].

Wie beim Problemlösungszyklus bereits angesprochen, folgen auch diese Aktivitäten keinem streng aufeinanderfolgenden Ablauf, sondern es sind Vor-/Rücksprünge und Überschneidungen zwischen den einzelnen Aktivitäten üblich.

Eine Übersicht zu Aspekten der Kreativität im Rahmen der Produktenwicklung zeigt die Richtlinie VDI 2806. Darin wird unter anderem sowohl auf die individuelle Kreativität als auch auf die Kreativität in Gruppen eingegangen.

Bei der Betrachtung komplexer Problemlösungsprozesse im Rahmen der Produktentwicklung ist ebenfalls relevant, dass die Lösung des Problems fast nie die Leistung einer einzelnen Person, sondern eher die von parallelen oder auch aufeinanderfolgenden Tätigkeiten einer Gruppe bzw. eines Teams von Problemlösern aus oftmals verschiedenen Fachdisziplinen darstellt.

Grundlage jeder Teamarbeit ist stets eine gute Kommunikation. Studien zeigen, dass die Leistung eines Teams beim Lösen komplexer Probleme insbesondere von umfassender, problembezogener und handlungsrelevanter Kommunikation profitiert [46]. Kommunikation stellt somit die Basis der Teamarbeit dar, auf der dann die Koordination und Kollaboration der verteilten Tätigkeiten aufbauen können.

Zur Koordination verteilter Arbeit müssen sowohl geeignete Modelle zum Problem, zu den (Zwischen-)Lösungen sowie insbesondere auch zum Vorgehen vorhanden sein. Dazu müssen vor allem implizite (allgemeingültige) und explizite (vereinbarte) Regeln zur zeitbezogenen Planung und Regelung der verteilten Vorgehensweisen sowie zu den Zuständigkeiten und dem Arbeitsfortschritt definiert werden [46]. Eine Zusammenfassung von Aspekten der Teamarbeit findet sich in der Richtlinie VDI 2807.

Eine klar strukturierte und allen Beteiligten bekannte Beschreibung des Vorgehens im Rahmen der Produktentwicklung auf Basis der zuvor dargestellten Erkenntnisse zum problemlösenden Denken ist somit für den verteilten Entwicklungsprozess in Unternehmen von großer Bedeutung. Im Folgenden werden diese Erkenntnisse zu einem Modell der Produktentwicklung weiter detailliert.

4 Modell der Produktentwicklung

Aus der in Abschnitt 3 dargelegten systematischen Problemlösungsmethodik, einschließlich der denkpsychologischen Erkenntnisse, sind Modelle für die Produktentwicklung ableitbar, die auf die speziellen Verhältnisse beim Entwickeln technischer Produkte zugeschnitten sind.

Solche Modelle müssen für die Vielfalt der Produktentwicklungsaufgaben anwendbar sein. Diese

As we have already mentioned in the context of the problem-solving cycle, these activities do not follow a strictly consecutive sequence. Instead, jumps back and forward as well as overlaps between the individual activities are quite usual.

The standard VDI 2806 shows an overview of aspects of creativity in the context of product design. This refers to individual creativity as well as creativity in groups.

In the consideration of complex problem-solving processes as part of product design, it is also relevant that the solution to the problem is almost never reached by one individual only but is usually the achievement of a group or team of problem-solvers who often come from different specialist disciplines.

Teamwork is always base on good communication. Studies show that the achievement of a team when solving complex problems profits above all from comprehensive communication, which is problem-related and relevant for action [46]. Communication is therefore the foundation for teamwork, and the coordination and collaboration of the distributed activities can be based on it.

The coordination of distributed work requires suitable models of the problem, the (intermediate) solutions and in particular the procedure. Above all, this requires the definition of implicit (universally applicable) and explicit (agreed) rules on the time-related planning and regulation of the distributed procedures and on the responsibilities and the work progress [46]. The standard VDI 2807 includes a summary of aspects of teamwork.

A clearly structured description, familiar to all those involved, of the procedure in the context of product design on the basis of the above insights into problem-solving thinking is therefore of great importance for the distributed design process in companies. In the following, these insights are described in more detail and used to create a model of product design.

4 Model of product design

From the problem-solving methodology described in Section 3, including the insights gained from thought psychology, it is possible to derive models of product design tailored to the special conditions prevailing during the designing of technical products.

Models of this kind shall be applicable to the diversity of product design tasks. These tasks are

Aufgaben werden deshalb in Abschnitt 4.1 einleitend charakterisiert, um die entwickelte Grobstruktur des Vorgehens zu begründen.

4.1 Produktentwicklung

4.1.1 Kontextfaktoren

Im Rahmen der Produktentwicklung sind über den gesamten Lebenszyklus hinweg unterschiedliche Entwicklungsziele zu erfüllen, wie die Funktionsoptimierung, die Kostenminimierung oder die Erfüllung weiterer Bedingungen (hinsichtlich Leistung, Leichtbau, Genauigkeit, Bedienbarkeit usw.). Die Beachtung weiterer, genereller eher technischer Anforderungsbereiche bzw. Restriktionen und Ziele kennzeichnet die Produktqualität, z. B. in Hinsicht auf Sicherheit, Fertigung, Montage, Verpackung, Transport, Recycling und Entsorgung. Solche Ziele müssen entsprechend ihrer Gewichtung entweder gleichberechtigt beachtet werden, oder einzelne Restriktionen bzw. Ziele prägen den gesamten Entwicklungsvorgang (siehe dazu auch Abschnitt 4.3.1).

Die Entwicklung von Produkten wird von einer Vielfalt an Kontextfaktoren bestimmt. Aus Sicht des Unternehmens kann zunächst zwischen externen und internen Faktoren unterschieden werden, siehe VDI 2221 Blatt 2.

Zu den externen Faktoren gehören entsprechend:

- makroökonomische Faktoren (z. B. Gesellschaft und Umwelt)
- mikroökonomische Faktoren (z. B. Markt und Kunde)

Zu den internen Faktoren gehören:

- organisatorische Faktoren (z. B. Unternehmensstruktur und -strategie, Branche)
- projektbezogene Faktoren (z. B. Innovationswesen und Projektmanagement)
- individuelle Faktoren (z. B. Wissen und Kompetenzen)

Diese Merkmale führen zu individuellen Ausprägungen von kontextspezifischen Modellen der Produktentwicklung (spezifische Produktentwicklungsprozesse), auf die in VDI 2221 Blatt 2 näher eingegangen wird.

Die Aufzählung dieser vielfältigen Ziele verdeutlicht bereits, dass die Entwicklung von Produkten in der Regel ein interdisziplinäres Vorgehen zusammen mit Personen aus Bereichen wie der Betriebswirtschaft, dem Industriedesign, der Produktion und/oder dem Vertrieb erforderlich macht. Der Ablauf des Entwicklungsprozesses wird nicht nur durch die Anforderungen an das Produkt selbst, son-

therefore initially characterised in Section 4.1 in order to justify the general structure of the procedure.

4.1 Product design

4.1.1 Contextual factors

In the context of product design, different design objectives are to be achieved throughout the entire lifecycle. These include function optimisation, cost minimisation and the fulfilment of further conditions (in terms of efficiency, lightweight design, precision, operability, etc.). Compliance with further requirement fields or restrictions and objectives characterises the product quality, for example with regard to safety, manufacture, assembly, packaging, transport, recycling and disposal. Depending on their weighting, objectives of this kind shall either be complied with equally, or the design process as a whole is characterised by individual restrictions or objectives (see Section 4.3.1 here too).

Product design is determined by a wide range of contextual factors. From the viewpoint of the company, an initial distinction can be made between external and internal factors, see VDI 2221 Part 2.

The external factors include:

- macroeconomic factors (such as society and the environment)
- microeconomic factors (such as market and customer)

The internal factors include:

- organisational factors (such as corporate structure and strategy, sector)
- project-related factors (such as innovation and project management)
- individual factors (such as know-how and competences)

These properties lead to individual manifestations of context-specific models of product design (specific product design processes) which are discussed in more detail in VDI 2221 Part 2.

The enumeration of these wide-ranging objectives illustrates that product design usually requires an interdisciplinary procedure in conjunction with persons from fields such as management, industrial design, production and/or distribution. The course of the design process is determined not only by the demands made on the product itself, but also by general external restraints or necessities present

dern auch durch allgemeine externe Zwänge oder innerbetriebliche Notwendigkeiten bestimmt. Diese Einflüsse lassen sich im Wesentlichen unter die drei Dimensionen Qualität, Kosten und Zeit subsumieren. Sie werden in VDI 2221 Blatt 2 näher betrachtet.

4.1.2 Produktlebenszyklus und Produktentstehung

Die Produktentwicklung ist ein wesentlicher Bestandteil der Produktentstehung und damit Grundlage des Produktlebenszyklus.

Zum Begriff des Produktlebenszyklus gibt es unterschiedliche Verständnisse. Während aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Lebensweg eines Produkts am Markt mit den Phasen „Produkteinführung“, „Wachstum“, „Reife“, „Sättigung“ und „Degeneration“ betrachtet wird (z.B. [22]), orientieren sich ökologische Ansätze (Ökobilanzierung, Eco-Design) an einer Ressourcenbetrachtung von der Rohstoffgewinnung/-erzeugung über die Produktion und Nutzung bis zur endgültigen Beseitigung des Produkts [47]. Die technische Sicht fokussiert den Lebensweg eines Produkts von der Produktentstehung über die Produktion/Realisierung und die Nutzung bis zum Lebenszyklusende. Die Produktentstehungsphase umfasst dabei die Aktivitäten „Produktplanung“, „Produktentwicklung“ und „Produktion/Realisierung“. Falls erforderlich, erfolgt in der Produktentstehungsphase zudem die Entwicklung der benötigten Produktionssysteme.

Bild 6 zeigt ein allgemeines Verständnis der technischen Sichtweise des Produktlebenszyklus.

Die Aktivitäten der Produktentstehung werden zwar häufig sequenziell aufeinander folgend dargestellt, in der Regel jedoch iterativ (Abschnitt 3.2.2) sowie (teil-)parallelisiert (Abschnitt 4.1.3) durchlaufen.

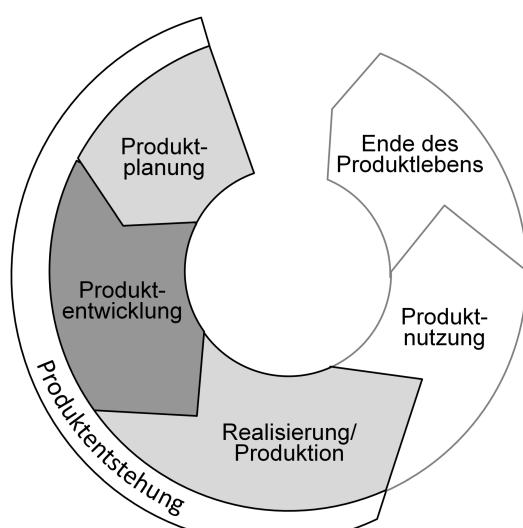


Bild 6. Technischer Produktlebenszyklus

within the company. These influences can mainly be subsumed under the three dimensions quality, costs and time. They are examined in more detail in VDI 2221 Part 2.

4.1.2 Product lifecycle and product creation

Product design is a key component of product creation, making it the basis of the product lifecycle.

The concept of the product lifecycle can be interpreted in a number of different ways. From a management point of view, the lifecycle of a product in the market is considered in terms of the phases “product launch”, “growth”, “maturity”, “saturation”, and “degeneration” (e.g. [22]), whereas ecological approaches (lifecycle assessment, eco-design) include resources in the calculation, from the extraction and production of raw materials to production and use and the ultimate disposal of the product [47]. The technical view focuses on the life of a product from product creation to production/implementation and use until the end of the lifecycle. The phase of product creation includes the activities “product planning”, “product design”, and “production/implementation”. If necessary, the production systems required are also designed in the phase of product creation.

Figure 6 shows a general interpretation of the technical view of the product lifecycle.

The activities associated with product creation are often displayed as following each other in a sequence, but they are usually passed through iteratively (Section 3.2.2) and (partially) in parallel (Section 4.1.3).

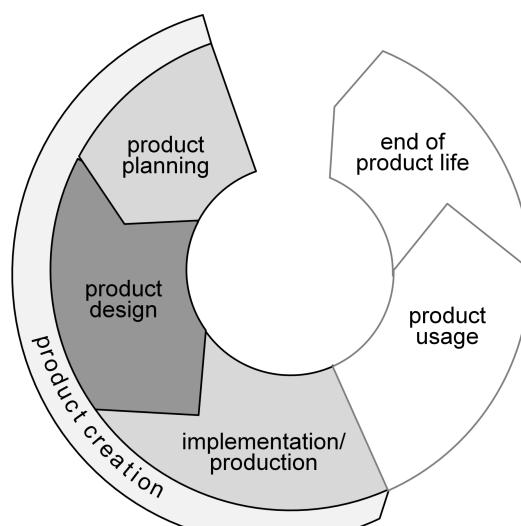


Figure 6. Technical product lifecycle

4.1.3 Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering

Konzepte des Simultaneous und des Concurrent Engineering fokussieren auf das Parallelisieren von Aktivitäten im Produktentstehungsprozess.

Beim Simultaneous Engineering werden unterschiedliche Aktivitäten (beispielsweise die Produktentwicklung und die Produktionssystementwicklung) überlappt und parallel ausgeführt.

Beim Concurrent Engineering wird dagegen eine einzelne umfangreiche Aufgabe (z.B. innerhalb der Produktentwicklung) auf mehrere Personen oder Gruppen aufgeteilt, die von diesen dann parallel bearbeitet wird.

Wichtigstes Kriterium für das Parallelisieren ist bei Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering die Frage, wann die Ergebnisse des vorher begonnenen Arbeitsschritts soweit stabil sind, dass die statistische Wahrscheinlichkeit einer Änderung und die damit verbundenen Änderungskosten geringer sind als die Kosten, die durch zu spätes Weiterarbeiten verursacht werden.

Stage-Gate-Ansätze sind führungsorientierte Modelle von Produktentstehungsprozessen und stellen den Ausgangspunkt für Simultaneous Engineering dar. Hierbei werden in einem Phasenmodell die Aktivitäten in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt. Auf diese Weise werden eine Planung und Steuerung des Entwicklungsprojekts ermöglicht.

Dazu werden Stages (deutsch „Phasen“) und Gates (auch „Quality Gates“, deutsch „Entscheidungs-Milestones“ oder „Tore“) definiert. Zu jedem Gate erfolgt ein Projektreview. Es wird darin dokumentiert, welche Ergebnisse zu den einzelnen Gates vorliegen.

Cooper [48] schlägt einen flexibleren Ansatz als Stage-Gate-Prozess der dritten Generation vor. Die unterschiedlichen Generationen von Stage-Gate-Prozessen sind in Bild 7 dargestellt.

Mit der ersten Generation wird der von der NASA in den 1960er-Jahren entwickelte Ansatz beschrieben. Die erste Generation ist stark von einer Auftraggeber- und Zulieferer-Sichtweise innerhalb des Produktentstehungsprozesses geprägt. Dabei ist jede Phase gleichzeitig der Kunde der vorhergehenden Phase.

4.1.3 Simultaneous engineering and concurrent engineering

Concepts of Simultaneous and Concurrent engineering focus on parallelising activities taking place in the process of product creation.

In the case of Simultaneous engineering, different activities (such as product design and production system design) are performed in an overlapping and parallel way.

In the case of concurrent engineering, in contrast, one extensive individual task (for example within product design) is divided up among several persons or groups who process the task in parallel.

With simultaneous engineering and concurrent engineering, the most important criterion for parallelisation is the question as to when the results of the work step commenced previously are stable enough to ensure that the statistical probability of a change including the associated change costs is lower than the costs caused by excessively late further work.

Stage-gate approaches are management-based models of product creation processes, which are used as the starting point for simultaneous engineering. Here the activities are displayed in their temporal sequence in the form of a phase model allowing the design project to be planned and controlled.

Stages and gates (also known as quality gates) are defined for this purpose. A project review is then performed for each gate. This review documents which results are available for the individual gates.

Cooper [48] proposes a more flexible approach to a stage-gate process of the third generation. The various generations of stage-gate processes are shown in Figure 7.

The approach developed by NASA in the 1960s is considered as the first generation. The first generation was strongly characterised by a customer and supplier view within the product creation process. Each phase is simultaneously the customer of the previous phase.

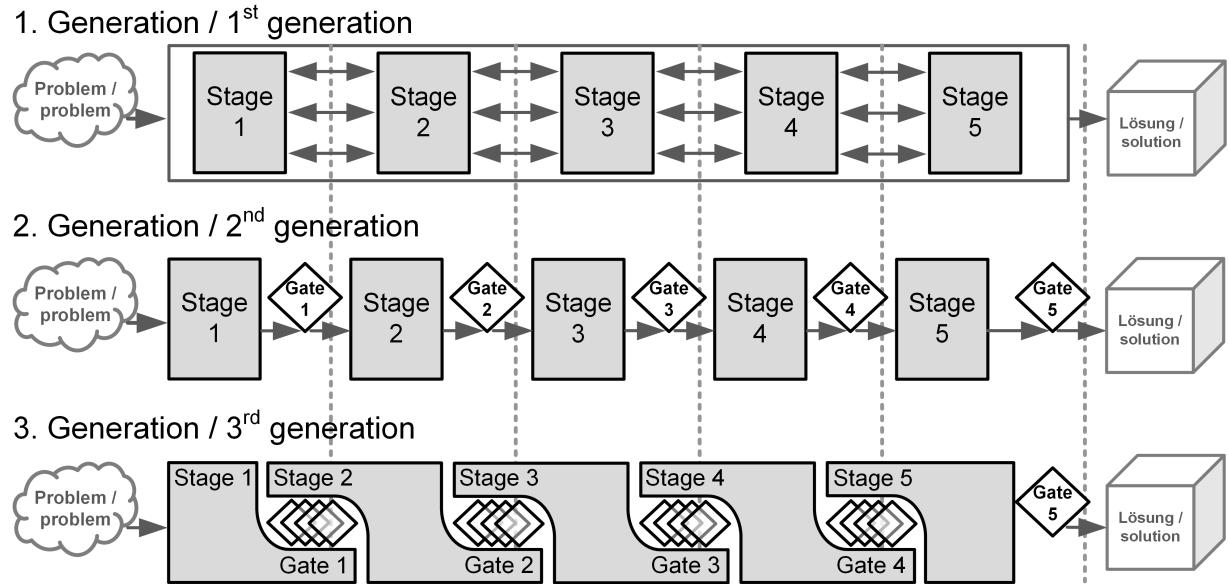


Bild 7. Stage-Gate-Ansätze unterschiedlicher Generationen (in Anlehnung an [48]) /
Figure 7. Stage-gate approaches of different generations (adapted from [48])

Dies führt zu einer Fokussierung auf das Ergebnis jeder Phase, wodurch alle Aufgaben am Ende einer Phase erledigt sein müssen, bevor mit der nächsten Phase begonnen werden kann. Neben den dadurch entstehenden zeitlichen Verzögerungen wird an diesem Vorgehen auch die Konzentration auf ausschließlich technische Aspekte kritisiert.

In der zweiten Generation von Stage-Gate-Modellen werden nicht technische Erfolgsfaktoren wie Marketingaspekte bei den Meilensteinen stärker berücksichtigt. Dadurch wird die Marktorientierung forciert und die Wahrscheinlichkeit eines Produkterfolgs erhöht. Außerdem können einzelne Aktivitäten in den Phasen parallelisiert werden. Dies erhöht zwar den Abstimmungsaufwand, kann aber gleichzeitig eine Zeitersparnis mit sich bringen. Eine Überlappung der Phasen ist aber nach wie vor nicht vorgesehen.

Das Potenzial zur Zeitersparnis durch überlappende Phasen nach *Takeuchi* und *Nonaka* [49] ist in Bild 8 angedeutet. Dieses Konzept greift *Cooper* in der dritten Generation von Stage-Gate-Prozessen auf. Dadurch wird der starke Bezug von Aktivitäten der Produktentwicklung und ihrer zeitlichen Abfolge aufgelöst. Außerdem werden Planänderungen durch eine flexiblere Gestaltung der Meilensteine besser berücksichtigt.

4.2 Allgemeines Modell der Produktentwicklung

Aus den dargelegten Zusammenhängen wird im Folgenden ein generelles, für die Aufgabenvielfalt gemäß Abschnitt 3.1 allgemein anwendbares Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren abgeleitet.

This leads to a focus on the result of each phase, with the result that all tasks performed at the end of a phase have to be completed before the next phase can begin. Besides the time delays this causes, this procedure is also criticised because it concentrates on purely technical aspects only.

In the second generation of stage-gate models, non-technical success factors such as marketing aspects are included in the gates to a greater extent. This drives the market orientation and increases the probability that the product will be successful. In addition, individual activities can be parallelised in the various phases. This increases the effort required for coordination, but it can also bring time savings with it. As before, however, the phases are not intended to overlap.

The potential for time savings as a result of overlapping phases according to *Takeuchi* und *Nonaka* [49] is indicated in Figure 8. *Cooper* takes up this concept in the third generation of stage-gate processes. This dissolves the strong connection between product design activities and their temporal sequence. Also, plan changes are better taken into account due to a more flexible design of the gates.

4.2 The general model of product design

Now we shall use the details described above to derive a general procedure for design and development suitable for the wide range of tasks listed in Section 3.1.

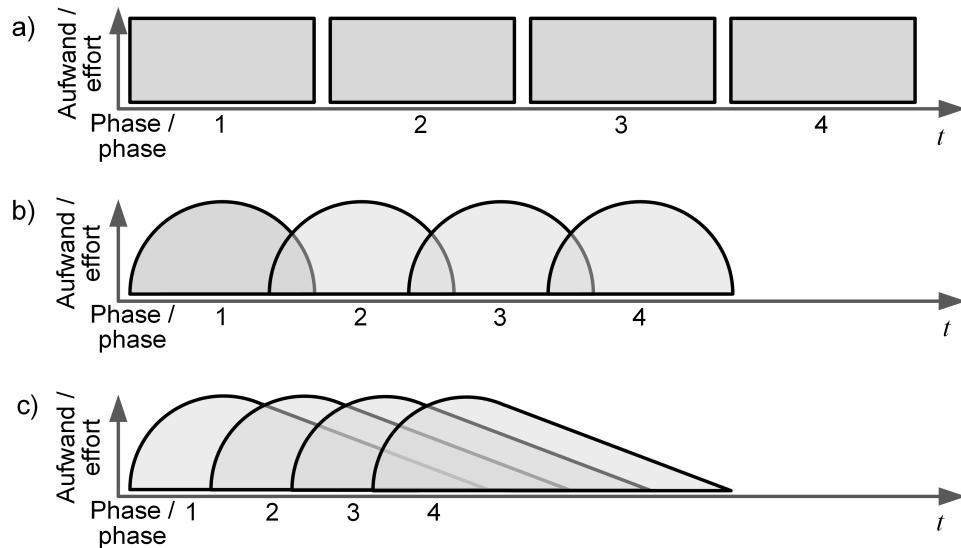


Bild 8. Sequenzielle (a) und überlappende Phasen (b und c) (in Anlehnung an [49]) /
Figure 8. Sequential (a) and overlapping phases (b and c) (adapted from [49])

Für Modelle zur Beschreibung eines generischen Vorgehens im Rahmen der Produktentwicklung gilt das gleiche wie für alle Modellbeschreibungen: Sie geben die Realität nur abstrahiert und reduziert für einen vorher definierten Zweck wieder.

Produktentwicklungsmodellen ist gemein, dass sie die Abläufe in der Produktentwicklung wie beim Stage-Gate-Prozess in eine idealisierte Form von einzelnen, sequenziell aneinandergereihten Arbeitsschritten mit einer Hierarchie von Phasen und untergeordneten Aktivitäten sowie dabei entstehenden Zwischenergebnisse untergliedern. Details zu zeitlichen Aspekten wie die tatsächliche Dauer, der Aufwand und die Überlappung oder die Anzahl an Wiederholungen von einzelnen Arbeitsschritten werden oftmals vereinfacht, da diese sehr stark von den bereits angesprochenen Kontextfaktoren abhängen.

Je nach Faktoren und Verwendungszweck existieren unterschiedliche Inhalte und Umfänge, die in Prozessabläufen betrachtet werden. Daraus ergeben sich unterschiedliche Darstellungsformen zur Beschreibung des Vorgehens. Auch wenn Vorgehensmodelle manchmal ähnliche Inhalte haben, so kann deren Darstellung dennoch stark variieren.

Bild 9 zeigt exemplarisch unterschiedliche Darstellungsarten von Abläufen innerhalb der zwei Dimensionen Detaillierungsgrad und Formalisierungsgang.

Vielen Darstellungsformen ist gemein, dass sie zur besseren Lesbarkeit eine starre und oftmals ideale Sequenzialität des Vorgehens suggerieren. Dies entspricht aber weder der Intention der Darstellungen noch der Realität. Entsprechend sind gedanklich Iterationsschleifen und Parallelisierungen zu ergänzen.

For models used to describe a generic procedure in the context of product design, the same is true as for all model descriptions: they depict reality in an abstract way only and reduce it to a previously defined purpose.

What models of product design have in common is the fact that they subdivide the processes of product design – such as those included in the stage-gate processes – and put them into an idealised form consisting of individual work steps strung together in a hierarchy of phases and secondary activities as well as intermediate results. Details on temporal aspects such as the actual duration, the effort and the overlap or the number of repetitions of individual work steps are often simplified as they depend very strongly on the contextual factors mentioned above.

Depending on factors and intended purpose, various different contents and volumes occurring in process sequences are considered. This leads to differing types of display for describing the procedure. Even though procedural models sometimes have a similar content, their depiction can vary strongly.

Figure 9 shows an example of different ways of displaying processes according to the two dimensions “degree of detail” and “degree of formalisation”.

Many types of display have in common that, for reasons of better legibility, they suggest a rigid and often ideal sequentiality of the procedure. However, this corresponds neither with the intention of the displays nor with reality. As a result, iteration loops and parallelisations are to be added mentally.

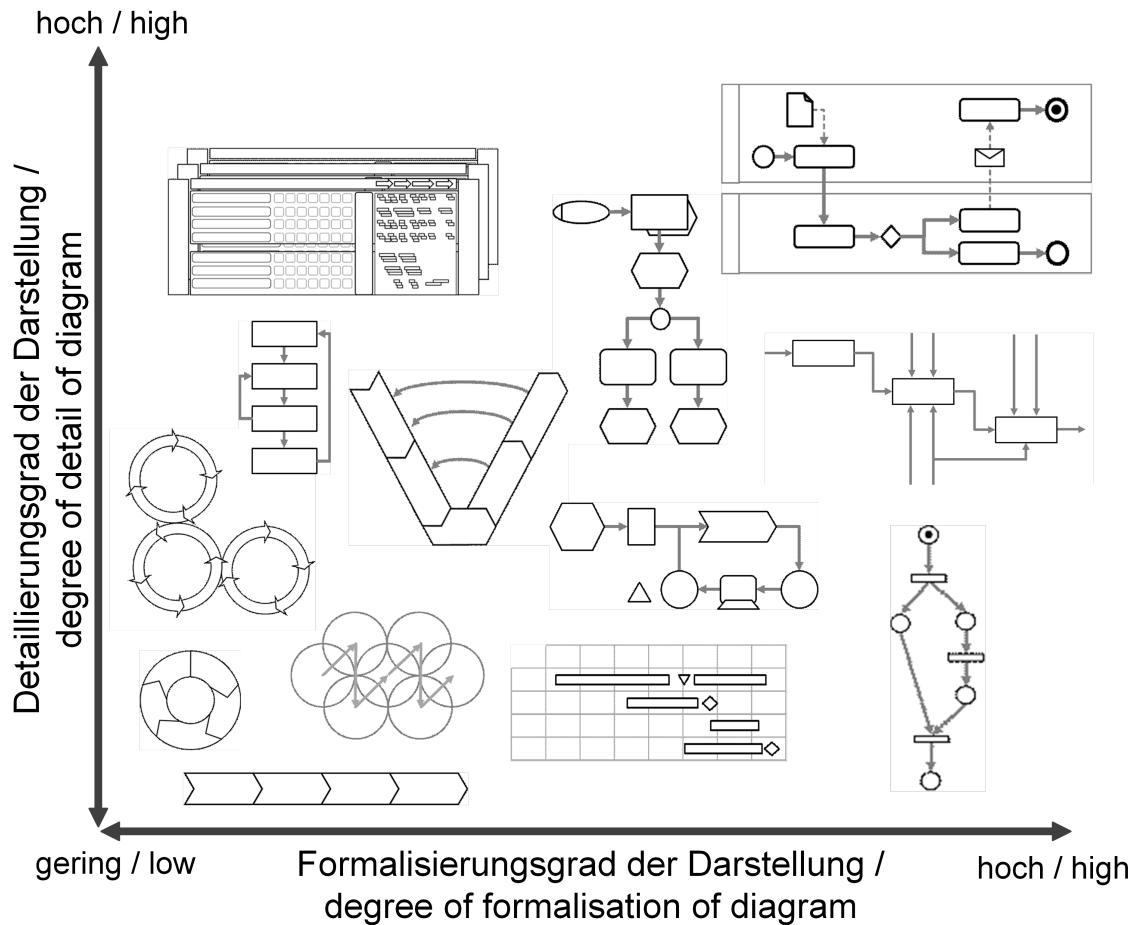


Bild 9. Unterschiedliche Darstellungsarten von Abläufen / Figure 9. Various ways of displaying processes

Die Beispiele in Bild 9 reichen von einfachen, nicht standardisierten grafischen Elementen zur Darstellung einfacher Zusammenhänge bis hin zu standardisierten Prozessbeschreibungen mittels Petrinetzen und verschiedenen Diagrammen, die aufgrund ihres hohen Formalisierungsgrads auch maschinell verarbeitbar sind und zur Simulation oder sogar Steuerung von Abläufen verwendet werden können. Solche Darstellungen werden häufig bei konkreten Vorgehensbeschreibungen verwendet. Allgemeiner verwendbare Vorgehensmodelle bedienen sich hingegen einer nicht formalisierten, einfachen, grafischen Darstellung der Abläufe.

So verfügen einfache Flussdiagramme über einen geringen Detaillierungs- und Formalisierungsgrad, während das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung [22] oder Netzwerke wie das „Münchener Vorgehensmodell“ [6] einen ganzheitlicheren Ansatz verfolgen. Einen höheren Grad der Formalisierung geben branchenspezifische Darstellungen wie das V-Modell der Richtlinie VDI 2206, mit dem sich mechatronische Systeme hinsichtlich ihres funktionalen Aufbaus aus Modulen (Systemelementen, Bauteile) betrachten lassen. Matrixorientier-

The examples shown in Figure 9 range from simple non-standardised graphical elements to the depiction of standardised process descriptions using Petri networks and various diagrams which can also be processed automatically and used for the simulation or even control of processes. Displays of this kind are often used for concrete procedural descriptions. In contrast, procedural models for more general application use a simple non-formalised graphic display of the processes.

Thus, simple flow diagrams have a low degree of detail and formalisation whereas the 3-cycle model of product creation [22] or networks like the “Munich procedural model” [6] pursue a more holistic approach. Sector-specific displays such as the V model from the standard VDI 2206 provide a higher degree of formalisation and allow mechatronic systems to be examined in terms of their functional structure consisting of modules (system elements, components). Matrix-based models such as the product creation model (iPeM) [47] give the

te Modelle wie das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) [47] geben dem Anwender eine detaillierte Orientierung durch die Beschreibung der Schritte in Mikro- und Makroaktivitäten. Als Vertreter der hoch formalisierten Darstellungsformen, die sowohl vom Menschen leicht lesbar als auch von Rechnern leicht verarbeitbar sind, sind unter anderem die „Ereignisgesteuerte Prozesskette“ (EPK), die „Structured Analysis and Design Technique“ (SADT) sowie die „Business Process Model and Notation“ (BPMN) zu nennen.

Basierend auf den dargelegten Beschreibungen und insbesondere auf der matrixorientierten Struktur des iPeM stellt Bild 10 ein Vorgehen als allgemeines Produktentwicklungsmodell mit einfachen grafischen Mitteln dar. Wenn die Darstellung in Bild 10 auch sequenziell erscheint, so werden die Arbeitsabschnitte doch eng verzahnt und je nach Aufgabenstellung vollständig, nur zum Teil oder auch mehrmals iterativ durchlaufen. Auf diesen Sachverhalt wird in VDI 2221 Blatt 2 näher eingegangen. Dort wird aufgezeigt, wie aus dem allgemeinen Modell der Produktentwicklung ein konkreter Ablauf in einem realen Projekt werden kann. Dieser Inhalt von VDI 2221 Blatt 2 ist in Bild 10 auf der rechten Seite angedeutet.

Bild 11 zeigt zusätzlich, wie das charakteristische Pendeln zwischen den verschiedenen Aktivitäten im Rahmen eines realen Produktentwicklungsprozesses zu unterschiedlichen Zeitabschnitten stattfinden kann.

Das in Bild 10 dargestellte allgemeine Modell der Produktentwicklung wird hier in Aktivitäten untergliedert, die das Vorgehen beim Entwickeln überschaubar, rationell und branchenunabhängig machen. Das Gesamtvorgehen zur Konzeptentwicklung, Detaillierung und Ausarbeitung wird in Aktivitäten gegliedert, aus denen erforderliche Arbeitsergebnisse hervorgehen.

Die (Zwischen-)Ergebnisse werden entlang des gesamten Vorgehens jeweils mit den (sich ebenfalls weiterentwickelnden) Anforderungen abgeglichen und je nach Fortschritt entweder durch virtuelle (Berechnung, Simulation) oder reale Absicherungen (Versuch, Test) oder auch mit einer Mischung aus beiden geprüft. In der Praxis werden oft einzelne Aktivitäten zu Entwicklungsphasen zusammengefasst, an denen sich terminliche oder organisatorische Ablaufpläne orientieren können.

user a detailed orientation by describing the steps in terms of micro- and macro-activities. The examples of the highly formalised types of display which are easy for humans to read as well as being computer-processable include the “Event-driven Process Chain” (EPC), the “Structured Analysis and Design Technique” (SADT) and the “Business Process Model and Notation” (BPMN).

Based on the descriptions given here and in particular on the matrix-based structure of the iPeM, Figure 10 shows a procedure as a general model of product design using simple graphical means. Although the display in Figure 10 looks sequential too, the work steps closely interlock and are run through completely, in part only or with several iterations depending on the task in hand. VDI 2221 Part 2 gives more details on this matter. It shows how the general model of product design can become a concrete process in a real-life project. This content of VDI 2221 Part 2 is indicated on the right-hand side of Figure 10.

Figure 11 also shows how the characteristic movement between the different activities can take place in different periods as part of a real-life product design process.

The general model of product design shown in Figure 10 is subdivided into activities, which make the design process straightforward, rational and sector-independent. The overall procedure for concept design, itemisation and elaboration is subdivided into activities from which necessary work results arise.

The (intermediate) results are compared with the (also developing) requirements throughout the entire procedure and, depending on the progress, verified either through virtual assurances (calculation, simulation), real assurances (experiments, tests) or a mixture of both. In practice, individual activities are often combined to form phases of development which can be followed by deadline or organisation schedules.

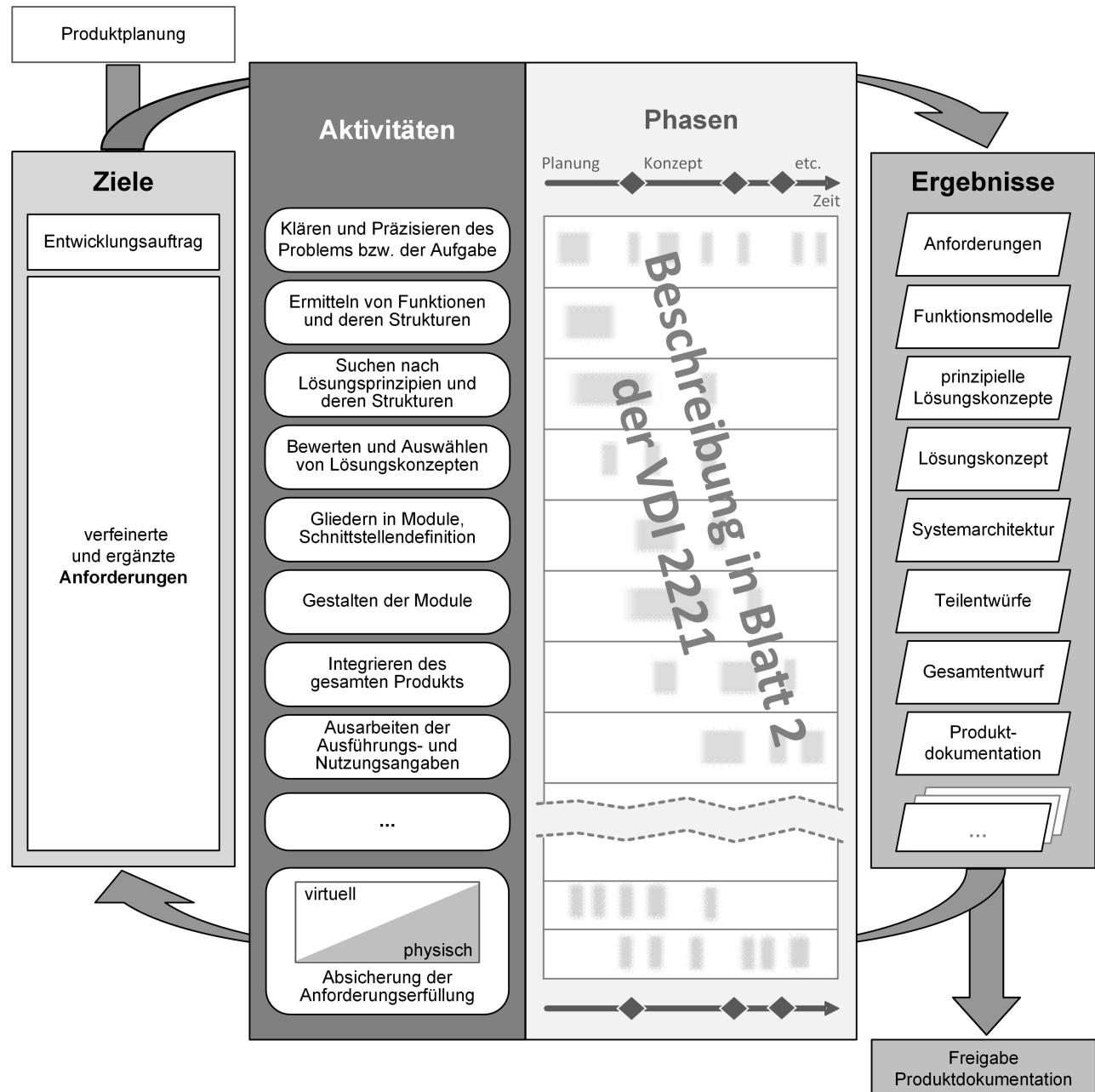


Bild 10. Allgemeines Modell der Produktentwicklung

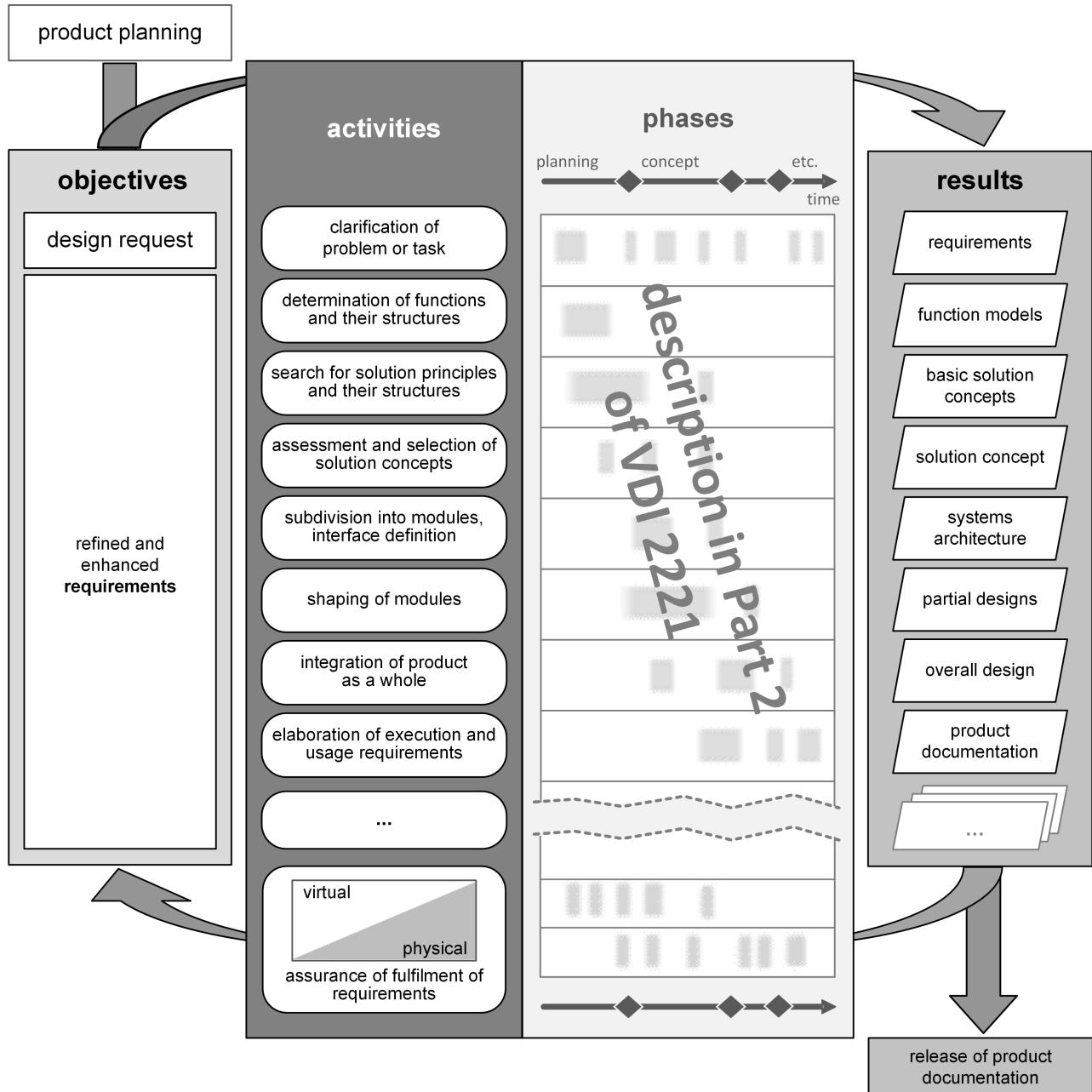


Figure 10. The general model of product design

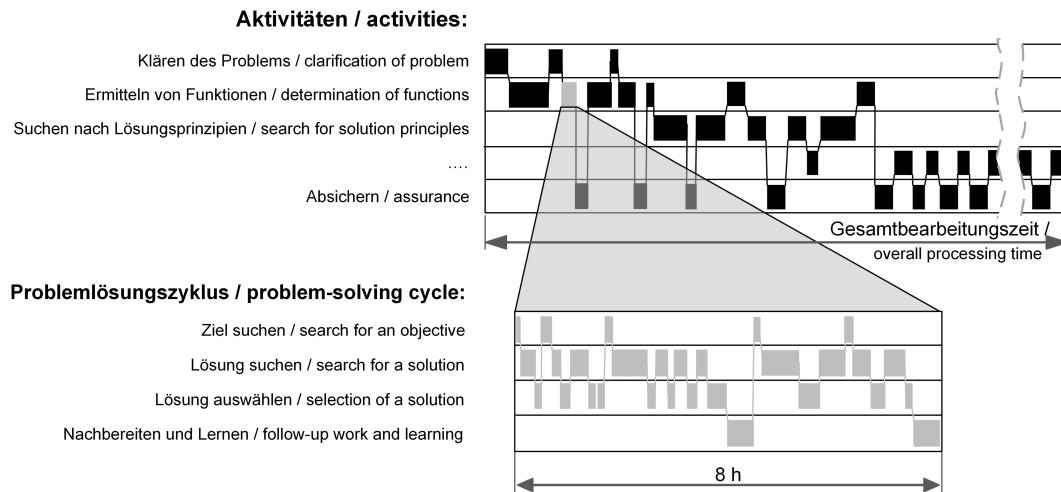


Bild 11. Pendeln zwischen verschiedenen Aktivitäten der Produktentwicklung bzw. der Problemlösung (in Anlehnung an [18]) /

Figure 11. Moving back and forth between different activities belonging to product design (adapted from [18])

Eine solche Zusammenfassung in Phasen kann je nach Produkt, Branche und Organisation im Unternehmen auf unterschiedlich Art und Weise erfolgen, sowie auch andere Begriffe verwenden. Weitere Details dazu sind in VDI 2221 Blatt 2 beschrieben.

Combining activities to form phases in this way can take place in different ways depending on the product, sector or organisation or can use other terms. Other details on this subject are described in VDI 2221 Part 2.

4.2.1 Ziele und Anforderungen

Ausgangspunkt für die Produktentwicklung ist oft eine unternehmensexterne oder auch -interne Produktplanung, welche eine je nach Projektsituation mehr oder weniger detaillierte Beschreibung eines Entwicklungsauftrags als Ergebnis hat. Die Bandbreite kann dabei vom namentlich benannten Auftraggeber und Kunden bis hin zur Entwicklung für abstrakte Kundengruppen oder Marktsegmente reichen. Ein Entwicklungsauftrag kann somit eine große Bandbreite aufweisen und sowohl Ideen, Wünsche, Visionen, Ziele usw. als auch bereits detaillierte Anwendungsfälle, Anforderungen zu Funktionen, Merkmalen oder Eigenschaften und Schnittstellen des Produkts beinhalten.

4.2.1 Objectives and requirements

The starting point for product design is frequently product planning inside or outside of the company, which results in a more or less detailed description of a design request depending on the project situation. The bandwidth can range from clients and customers known by name to design for abstract customer groups or market segments. A design request can thus have a large bandwidth and include ideas, wishes, visions and objectives, etc. as well as detailed applications and requirements with regard to functions, characteristics or properties and interfaces of the product.

Der Auftraggeber steht meist nur stellvertretend für die Bedürfnisse von Personen(gruppen) oder Organisationen, die an dem zu entwickelnden Produkt irgendein Interesse haben bzw. davon in irgendeiner Art und Weise betroffen sein werden. Das können z.B. die Benutzer, Bediener, Betreiber, Besitzer, aber auch die Entwickler, Hersteller, Verkäufer, Lieferanten, Käufer, Entsorger, Gesetzgeber oder auch nur die Betrachter eines Produkts sein. Sie alle haben sehr unterschiedliche Anforderungen an das Produkt und werden als Personengruppen häufig mit dem englischen Begriff „Stakeholder“ (Interessensvertreter, Wissensträger, Betroffene, Anspruchsberichtigte) zusammengefasst, der auch meist im Deutschen verwendet wird.

The customer usually just stands for the needs of (groups of) persons or organisations, which have an interest of some kind in the product to be designed or are affected by it in some way. These can for example be users, controllers, operators or owners, but also designers, manufacturers, sellers, suppliers, buyers, disposers, legislators or just viewers of a product. These all have very different requirements with regard to the product and, as groups of persons, are all often referred to as “stakeholders”.

Anforderungen werden damit nicht nur an gesamten Produkt oder an seinen einzelnen Bestandteilen und Schnittstellen gestellt, sondern auch an den mit dem Produkt verbundenen Phasen des Produktlebenszyklus sowie auch an Entwicklungsprojekt selbst (z.B. zu Kosten, Terminen, Vertragsfragen).

Damit wird deutlich, dass Anforderungen nicht nur zu Beginn der Produktentwicklung erhoben und dokumentiert werden, sondern dass diese in unterschiedlichen Detaillierungsgraden kontinuierlich verfeinert, abgeleitet und gegebenenfalls auch immer wieder aktualisiert und geändert werden müssen.

In der Praxis werden definierte Teile von Anforderungen zu bestimmten Meilensteinen freigegeben und eingefroren, um die Entwicklungsdauer nicht aufgrund fortlaufender Änderungen unbestimmt zu machen. Ein wichtiger Grund für das Einfrieren von Anforderungen ist vor allem auch die arbeitsteiligen Prozesse der Produktentwicklung. Anforderungen sind in der Regel eine zentrale Kommunikationsbasis, wenn Lösungen durch mehrere beteiligte Personen, Bereiche oder Unternehmen parallel oder aufeinanderfolgend erarbeitet werden.

Ein extern eingebrachter Auftrag wird in der Regel als rechtlich verbindliches Vertragsdokument in Form eines Lastenhefts formuliert. In diesem sollen nach DIN 69901-5 die „vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrags“ enthalten sein. Im weiteren Verlauf der Produktentwicklung wird dann als Antwort darauf ein Pflichtenheft erstellt, welches die „vom Auftragnehmer erarbeiteten Realisierungsvorgaben auf der Basis des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenhefts“ enthält (siehe auch VDI 2519 Blatt 1).

Anforderungen sollten sowohl untereinander als auch zu den Lösungselementen sowie zu „Aktivitäten der Absicherung“ nachvollziehbar vernetzt werden. Die mit der Dokumentation und Pflege der Anforderungen verbundenen Aktivitäten werden auch als Anforderungsmanagement bezeichnet. Diese Nachvollziehbarkeit herzustellen und im Laufe der Entwicklung auch kontinuierlich zu pflegen, kann sehr aufwändig sein, erzeugt aber die Möglichkeit, die Auswirkung von Fehlern oder Änderungen schneller beurteilen zu können. Deshalb wird sie z.B. bei der Entwicklung von sicherheitskritischen Produkten meist vorgeschrieben. Daher werden diese Aktivitäten durch spezielle Softwarewerkzeuge des Anforderungsmanagements unterstützt.

As a result, requirements are not just formulated in terms of the product as a whole or its individual components and interfaces, but also with reference to the phases of the product lifecycle associated with the product and the design project itself (for example costs, deadlines and contractual matters).

This shows that requirements are not just formulated and documented at the beginning of project design, but are constantly refined, derived and if necessary updated and changed again and again in varying degrees of detail.

In practice, defined parts of requirements are released and frozen when certain gates are reached in order not to make the design duration indeterminable as a result of constant changes. In particular product design processes based on the division of labour are an important reason for freezing requirements. Requirements are usually a central basis for communication when solutions are elaborated in parallel or in succession by several persons, departments or companies.

An externally input order is usually formulated as a legally binding contractual document in the form of a functional specification. According to DIN 69901-5, this shall include the “totality of demands made by the customer on the deliveries and services of a contractor in the context of an order”. This is then responded to in the further course of product design with a technical specification containing the “specifications for implementation elaborated by the contractor on the basis of the functional specification drawn up beforehand by the customer” (see also VDI 2519 Part 1).

Requirements should be networked in a comprehensible way with regard to one another, the solution elements and “assurance activities”. The activities connected with the documentation and maintenance of the requirements are also referred to as “requirements management”. It can be extremely laborious to create this comprehensibility and constantly maintain it in the course of product design, but it also provides the opportunity to assess the effects of errors or changes more rapidly. This is why this comprehensibility is for example usually prescribed for the design of safety-critical products. It is also the reason why these activities are supported by special software tools belonging to requirements management.

Von besonderer Bedeutung ist der Bezug zwischen Anforderungen und der Analyse bzw. der Absicherung der entwickelten Ergebnisse. Jede Anforderung gibt das zu erreichende Ziel (Soll) vor, mit dem ein Ergebnis (Ist) irgendwann abgeglichen werden muss (Soll-Ist-Vergleich). Zu jeder Anforderung sollte deshalb auch beschrieben sein, von wem, wie und womit geprüft wird, ob diese Anforderung erfüllt ist.

Weitere Informationen zum Erheben, Analysieren, Dokumentieren, Strukturieren, Abstimmen, Bewerten und Prüfen von Anforderungen finden sich unter anderem in [48; 49].

4.2.2 Aktivitäten und Ergebnisse

Im Folgenden werden Aktivitäten der Produktentwicklung vorgestellt. Sie können je nach Komplexität der Aufgabenstellung noch in weitere Teilaktivitäten untergliedert werden. Als wichtige Aussage sei hier noch einmal wiederholt, dass die Aktivitäten nicht starr nacheinander ablaufen müssen, sondern durch Zurückgehen auf vorangegangene Abschnitte häufig iterativ durchlaufen werden, um schrittweise bessere Lösungen oder Optimierungen zu erreichen.

Abhängig von der Entwicklungsaufgabe (siehe Abschnitt 4.1.1) sind Aktivitäten im Rahmen einer Produktentwicklung in unterschiedlicher Intensität notwendig (siehe dazu VDI 2221 Blatt 2). Die beschriebenen Entwicklungsabläufe müssen im Unternehmen organisatorisch eingebunden sein, was auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen kann. Festzulegen sind hierzu die Ablauforganisation des Entwicklungsprozesses, dessen Aufbauorganisation und ein leistungsfähiges Informationsmanagement. Besonders letzteres wird stark vom Rechnereinsatz geprägt (Abschnitt 6). Ablauf- und Aufbauorganisation sollen für unterschiedliche Aufgabenstellungen flexibel anpassbar bzw. veränderbar sein und durch ein geeignetes Projektmanagement und Änderungsmanagement unterstützt werden.

4.2.2.1 Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe

Anforderungen gehören nicht nur zu den Zielen, sondern sind zugleich auch ein Ergebnis von Aktivitäten, die rund um das Klären und Präzisieren des Auftrags bzw. der Aufgabe oder des Problems stattfinden. Zu diesen Aktivitäten gehören z. B. das Zusammenragen aller verfügbaren Informationen zum Produktkontext und das Erkennen von Informationslücken, das Überprüfen und Ergänzen der erhaltenen Anforderungen, das Hinzufügen eigener Anforderungen bzw. das bewusste Formulieren des Problems aus Sicht des Entwicklers einschließlich

Of particular importance is the relationship between the requirements and the analysis and/or assurance of the results developed. Each requirement specifies the objective (target) to be achieved with which a result (actual) has to be coordinated at some point (target-actual comparison). For each requirement, therefore, it is necessary to describe who verifies in which way and with what whether this requirement is met.

For further information on the formulation, analysis, documentation, structuring, alignment, assessment and verification of requirements, please see for example [48; 49].

4.2.2 Activities and results

Various product design activities belonging to product design are presented in the following. Depending on the complexity of the task, they can be further subdivided into other partial activities. At this point, let us once more repeat the important statement that the activities do not have to be performed rigidly one after the other but are instead often run through iteratively by returning to previous sections in order to gradually achieve better solutions or optimisations.

Depending on the design task (see Section 4.1.1), activities of varying intensity are necessary as part of product design (see VDI 2221 Part 2 on this subject). The design processes described shall be integrated into the organisation of the company, something which can be realised in a number of different ways. The organisation of the design process, its structural organisation and efficient information management are to be defined for this purpose. In particular, the latter is strongly characterised by the use of computers (Section 6). Procedural and structural organisation shall be flexibly adaptable and/or changeable for different tasks and be supported by suitable project management and change management.

4.2.2.1 Clarifying and itemising the problem or task

Requirements not only belong to the objectives but are also the result of activities taking place with regard to the clarification and itemisation of the assignment, task or problem. These activities for example include the collecting of all available information on the product context and the identification of information gaps, the verification and completion of the requirements received, the addition of requirements of one's own and/or the conscious formulation of the problem from the viewpoint of the developer including structurations

bereits möglicher und notwendiger Strukturierungen und dem Planen des weiteren Vorgehens.

Eine Formulierung und vor allem Präzisierung des zu lösenden Problems erleichtert die Lösungssuche, weil mit dieser Beschreibung der Kern des Problems und die zu beachtenden Anforderungen – ohne Vorfixierung auf Lösungen in der Sprache, den Bildern oder den Modellen des Bearbeiters – ausgedrückt werden können. Ein zentrales Arbeitsergebnis ist dabei auch eine strukturierte Sammlung von Anforderungen.

Die Anforderungen sind für alle folgenden Aktivitäten eine begleitende, weiter zu verfeinernde und stets auf dem aktuellen Stand zu haltende Informationsbasis. Erkenntnisse während des Entwicklungsablaufs können dazu führen, dass bestehende Anforderungen geändert sowie neue Anforderungen hinzugefügt werden müssen. Entsprechend der zentralen Bedeutung von Anforderungen müssen Änderungen bzw. Ergänzungen an den Anforderungen fortlaufend und konsequent durchgeführt und dokumentiert werden sowie zugleich auch immer gegenüber Änderungswünschen der Produktplanung bzw. des Auftraggebers hin offen sein. Die Definition und Verwendung der Anforderungen endet auch nicht mit der Freigabe der Entwicklungsdokumentation, sondern sie setzt sich auch mit der Realisierung des Produkts fort.

4.2.2.2 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

Eine weitere zentrale Aktivität im Rahmen der Produktentwicklung besteht im Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen. Insbesondere bei Neuentwicklungen oder grundsätzlichen Problemlösungen kann eine funktionsorientierte Herangehensweise helfen, den Suchraum zu erweitern und die Suche nach alternativen oder innovativen Lösungsprinzipien unterstützen. Funktionen bilden zudem die Grundlage für verbreitete Entwicklungsmethoden wie die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA).

Funktionen definieren, was das Produkt oder ein Bestandteil davon tut bzw. tun soll. Neben rein technischen Funktionen, die z.B. durch physikalische oder mathematische Zusammenhänge als Gleichungen beschrieben werden, müssen in soziotechnischen Systemen jedoch noch weitere Arten von Funktionen betrachtet werden. Funktionen werden deshalb oftmals in einer einfachen „Objekt-Verb-Form“ (z.B. „Energie bereitstellen“) beschrieben. In soziotechnischen Systemen werden neben den auf den Zweck des Produkts fokussierenden technischen Gebrauchsfunktionen (z.B. „Drehbewegung erzeugen“) zusätzlich auch noch sogenann-

which are necessary or already possible as well as the planning of the further procedure.

The formulation and above all itemisation of the problem to be solved facilitates the search for a solution because this description is able to express the core of the problem and the requirements to be complied with – without any premature fixation according to the metaphors, the language or the models of the processor. A structured collection of requirements is another central work result here.

The requirements are an information base which accompanies all subsequent activities and are to be kept up-to-date at all times. Knowledge acquired during the design process can mean that existing requirements have to be changed and new requirements added. In accordance with the central importance of requirements, changes or additions to the requirements have to be made and documented continuously and consistently as well as being open at all times towards change requests made by product planning or the customer. The definition and use of the requirements does not end with the release of the design documentation, but continues when the product is realised.

4.2.2.2 Determining functions and their structures

Another central activity in the context of product design is the determination of functions and their structures. In particular with new developments or fundamental problem solutions, a function-based approach can help to expand the search space and support the search for alternative or innovative solution principles. Functions also form the basis for widespread design methods such as Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).

Functions define what the product or a component of it does or is intended to do. Besides purely technical functions, which are for example described by physical or mathematical relationships in the form of equations, further types of functions shall be taken into account in sociotechnical systems. For this reason, functions are often described in a simple “verb and object” form (such as “provide energy”). In sociotechnical systems, in addition to the technical user functions which focus on the purpose of the product (for example “Generate rotary movement”), so-called validity functions (such as “radiate valence”) are considered. These

te Geltungsfunktionen (z.B. „Wertigkeit ausstrahlen“) betrachtet, zu denen z.B. die Anmutung, Ästhetik oder Symbolik eines Produkts zählen (VDI 2803 Blatt 1). Darüber sollten neben erwünschten Zweckfunktionen auch unerwünschte Störfunktionen (z.B. „Lärm verursachen“) unterschieden werden, damit auch dafür Lösungen zu ihrer Vermeidung oder Minderung ermittelt werden können. Alle Arten von Funktionen können zusätzlich noch nach Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden werden, um die Relevanz von einzelnen Funktionen hervorzuheben.

Bei einfachen Produkten genügt oft eine rein verbale Beschreibung in Form von Funktionslisten. Für komplexere Produkte mit umfangreicheren Energie-, Stoff- und Informationsflüssen kommen hingegen Funktionsmodelle, wie hierarchisch strukturierte Funktionsdiagramme (Funktionshierarchien, Funktionsbäume) aus Gesamt- und Teifunktionen sowie graphen- oder matrizenorientierte Funktionsstrukturen zum Einsatz, welche die netzwerkartigen Beziehungen zwischen Funktionen besser verdeutlichen. Eine solche – zunächst möglichst technologieneutrale – Beschreibung aller Funktionen, in der verschiedene funktionsorientierte Zusammenhängen im Hinblick auf die zu entwickelnden Bestandteile des Produkts geordnet werden, wird auch als funktionale Architektur bezeichnet. Sie dient als Grundlage für die spätere Gestaltung der logischen Architektur sowie der physischen Produktarchitektur.

Die Richtlinie VDI 2803 Blatt 1 sowie Literatur zur Produktentwicklung [18; 21] und zur Anwendung der UML oder SysML [12] zeigen, wie Funktionen und deren Architekturen beschrieben werden können. Dabei zeigen Untersuchungen, dass insbesondere durch die integrative Betrachtung von Funktion und Gestalt komplexe technische Fragestellungen bearbeitet werden können [5].

4.2.2.3 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

Für die festgelegten Funktionen oder Gruppen von Funktionen folgt das Suchen nach Lösungsprinzipien und ihren Strukturen. Dabei werden zunächst Lösungsprinzipien für die wesentlichen Teifunktionen gesucht. Hierzu müssen in einem ersten Schritt natürliche (physikalische, chemische, elektrische ...) oder andere Effekte (z.B. Algorithmen aus der Informationstechnik) ausgewählt werden.

Anschließend müssen diese Effekte durch sogenannte wirkstrukturelle Festlegungen (Wirkprinzipien) realisiert werden. Bei mechanischen Bestandteilen betreffen solche wirkstrukturellen Festlegungen z.B. die Geometrie (Wirkgeometrie), die Be-

for example include the look and feel, the aesthetics or the symbolism of a product (VDI 2803 Part 1). In addition, besides unwanted technical functions, unwanted disturbance functions (for example “cause noise”) should also be distinguished so that solutions for avoiding or reducing them can be determined. All types of functions can additionally be distinguished according to main and secondary functions in order to emphasise the relevance of individual functions.

For simple products, it often suffices to give a purely verbal description in the form of function lists. In contrast, for more complex products with more extensive energy, material and information flows, function models such as hierarchically structured function diagrams (function hierarchies, function trees) consisting of overall functions and subfunctions as well as graph- or matrix-based function structures which better illustrate the network-type relationships between functions are used. This kind of description of all functions should initially be as technology-neutral as possible. In it, different function-based relationships are structured with regard to the components to be designed for the product, so it is also known as a functional architecture. It serves as a basis for the later design of the logical architecture and the physical product architecture.

The standard VDI 2803 Part 1 as well as the literature on product design [18; 21] and the use of UML or SysML [12] show how functions and their architectures can be described. Analyses show that complex technical matters can be dealt with in particular as a result of the integrative consideration of function and form [5].

4.2.2.3 Searching for solution principles and their solutions

The search for solution principles and their structures then follows for the functions or groups of functions defined. At first, solution principles for the main partial functions are searched for. For this, it is necessary in a first step to select natural (physical, chemical, electrical, ...) or other effects (such as algorithms from information technology).

Then these effects have to be realised by means of definitions of the effective structure (effective principles). For mechanical components, such definitions of the effective structure for example concern the geometry (effective geometry), the move-

wegung (Wirkbewegung) oder die Werkstoffart. Die für Teilstrukturen gefundenen Wirkprinzipien können anschließend zu Wirkstrukturen verknüpft werden, die das Lösungsprinzip zum Erfüllen der Gesamtfunktion beschreiben. Dabei können z.B. wieder weitere Funktionen (Nebenfunktionen oder unerwünschte Funktionen) erkennbar werden, die die Realisierung bestimmter Effekte bzw. Lösungsprinzipien erst möglich machen oder auch verhindern. Die Kombination von Wirk- bzw. Lösungsprinzipien zu Gesamtlösungskonzepten kann beispielsweise durch die Methode des „Morphologischen Kastens“ unterstützt werden. Die Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 beschreibt weitere Details zum Suchen nach Lösungsprinzipien und zum Beschreiben von Wirkstrukturen.

Arbeitsergebnisse der Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen sind eine oder mehrere prinzipielle Lösungen, die die Wirkstruktur zum Erfüllen einzelner Funktionen oder der ganzen Funktionsstruktur des zu entwickelnden Produkts darstellen. Die prinzipiellen Lösungen können als verbale Beschreibungen, Prinzipskizzen, Diagramme, Zeichnungen oder Modelle dokumentiert werden und bilden zusammen ein oder auch mehrere prinzipielle Lösungskonzepte. Die Lösungskonzepte stellen die logische Architektur des Produkts dar.

4.2.2.4 Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts

Aufgrund der kontinuierlichen Überprüfung der Ergebnisse gegenüber den Anforderungen wird die Menge möglicher Lösungen zwar bereits fortlaufend eingeschränkt, in der Regel bleiben aber dennoch unterscheidbare Alternativen von prinzipiellen Lösungskonzepten übrig, die alle die zuvor definierten Anforderungen erfüllen. Da eine Detaillierung aller Alternativen aus zeitlichen oder finanziellen Gründen meist nicht möglich ist, muss es demnach bewusste Aktivitäten zur Bewertung und Auswahl der vielversprechendsten Lösungskonzepte geben.

Dazu gilt es, zunächst geeignete Bewertungskriterien zu definieren. Dies erfolgt z.B. durch eine Gewichtung der bereits vorhandenen Anforderungen. Es kann jedoch auch erforderlich sein, dass zusätzlich weitere Kriterien definiert werden müssen. Oft sind diese Kriterien, mit denen der Aufwand (Kosten oder Zeit) und der Nutzen eines prinzipiellen Lösungskonzepts sowie damit gegebenenfalls verbundene Risiken zum weiteren Bewerten herangezogen werden.

Das Durchführen von Bewertungen kann je nach Komplexität und Ziel der Bewertung durch unterschiedliche Methoden (paarweiser Vergleich, ABC-

ment (effective movement) or the type of material. The effective principles found for partial functions can then be linked to form effective structures which describe the solution principle for fulfilling the overall function. Other functions (secondary functions or undesirable functions) which allow or prevent the implementation of certain effects or solution principles can for example be identified here. The combination of effective or solution principles to form overall solution concepts can for instance be supported by the “morphological box” method. The standard VDI 2222 Part 1 provides further details on searching for solution principles and describing effective structures.

Work results of the search for solution principles and their structures are one or more fundamental solutions mapping the effective structure for fulfilling individual functions or the entire function structure of the product to be designed. The fundamental solutions can be documented as verbal descriptions, principle sketches, diagrams, drawings or models. Together they form one or more fundamental solution concepts. The solution concepts map the logical architecture of the product.

4.2.2.4 Assessing and selecting the solution concept

As a result of the continuous comparison of the results with the requirements, the amount of possible solutions is constantly restricted, but this generally still leaves behind distinguishable alternatives of fundamental solution concepts which fulfil all the requirements defined beforehand. As it is usually not possible for technical or financial reasons to describe all alternatives in detail, deliberate activities for assessing and selecting the most promising solution concepts are required.

For this, it is first necessary to define suitable assessment criteria. This is for example done by weighting the existing requirements. However, it can also be necessary to define additional criteria. These are often criteria for which the effort (cost or time) and the benefit of a fundamental solution concept as well as risks possibly associated with it are used for further assessment.

Depending on complexity and objective of the assessment involved, the execution of assessments can be supported by different methods (pair-by-

Analyse, SWOT-Analyse, Nutzwertanalyse o.Ä.) unterstützt werden [10; 18].

Häufig beruhen diese Bewertungsmethoden auf einer verbalen oder einer mathematischen Gegenüberstellung der Lösungskonzepte in einfachen Tabellen oder auch komplexeren Matrizen. Da jedoch auch für Bewertungen ähnliche Merkmale (Intransparenz, Vernetztheit, Dynamik) wie für Probleme gelten, können die meisten Bewertungen letztlich nicht frei von subjektiven Einflüssen durchgeführt werden. Deshalb sind auch bei mathematischen Verfahren die resultierenden Bewertungsergebnisse stets zu hinterfragen und keinesfalls dogmatisch als unveränderbar hinzunehmen. Insbesondere bei geringem Unterschied in den Bewertungsergebnissen sollten letztlich auch Erfahrung und Intuition bei der finalen Entscheidung für ein Lösungskonzept mit einfließen.

Die Entscheidungen und die Ergebnisse jeder Bewertung sollten ebenso wie der Weg dorthin mit all ihren dafür definierten Parametern dokumentiert werden. Nicht nur, weil dies dem Nachweis eines einwandfreien Vorgehens dient, sondern auch weil diese Informationen oft im Rahmen von später stattfindenden Iterationen erneut verwendet und dann untereinander verglichen werden können.

4.2.2.5 Gliedern in Module – Schnittstellendefinitionen

Sind die auszuarbeitenden Lösungskonzepte ausgewählt, werden diese in zu realisierende Module gegliedert, bevor deren weitere, in der Regel arbeitsaufwändige Konkretisierung erfolgt.

Arbeitsergebnis ist eine Systemarchitektur (modulare Struktur, modulare physische Produktarchitektur), welche die funktionale und die logische Architektur (Funktionsstruktur und Wirkstruktur) aus früheren Aktivitäten weiterentwickelt und die angestrebte Lösung in die für deren Realisierung wesentlichen Gruppen und Elemente (Teilsysteme und Systemelemente) gliedert, einschließlich deren Verknüpfungen (Schnittstellen). Darstellungsformen können z.B. Anordnungsskizzen, Graphen, Logikpläne, Struktogramme oder UML- bzw. SysML-Diagramme sein.

Eine Modularisierung vor den arbeitsintensiven Gestaltungsschritten vorzunehmen ist insbesondere bei komplexen Produkten wichtig, um eine effiziente Aufteilung der Entwicklungsarbeit zu erleichtern und durch Strukturierung bestimmte Entwicklungsschwerpunkte besser erkennen und lösen zu können.

Module können disziplinspezifisch (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software) oder nach arbeitstechnisch-pragmatischen Gesichtspunkten auch

pair comparison, ABC analysis, SWOT analysis, benefit analysis, etc.) [10; 18].

These assessment methods are often based on a verbal or mathematical comparison of the solution concepts in the form of simple tables or more complex matrices. However, as similar properties apply for assessments as they do for problems (lack of transparency, networking, dynamics), most assessments ultimately cannot be free from subjective influences. With mathematical procedures too, therefore, the results of the assessment are to be questioned at all times and never accepted dogmatically as being unchangeable. In particular, when assessment results only differ to a minor's extent, experience and intuition should ultimately be included in the final decision for a solution concept.

The decisions and the results of each assessment as well as the way to get there should be documented with all of their parameters defined for this purpose. This is not only because this procedure allows verification as to whether the procedure was faultless, but also because this information can often be used again and then compared in the context of iterations taking place afterwards.

4.2.2.5 Subdivision into modules – interface definitions

Once the solution concepts to be elaborated have been selected, they are subdivided into modules to be realised before their further – usually time-consuming – concretisation takes place.

The work result is a systems architecture (modular structure, modular physical product architecture) which further develops the functional and the logical architecture (function structure and effective structure) from earlier activities and subdivides the intended solution into the main groups and elements essential for its implementation (partial systems and system elements) including their links (interfaces). Forms of display can for example be layout drawings, graphs, logic diagrams, structure charts, or UML or SysML diagrams.

With complex products in particular, it is important to perform modularisation prior to the labour-intensive design steps in order to facilitate the effective subdivision of the design work and use structuring to better identify and solve certain design focuses.

Modules can be formed in a discipline-specific way (mechanics, electrics/electronics, software) or in an interdisciplinary manner according to prag-

disziplinübergreifend (mechatronische Systeme) gebildet werden.

An dieser Stelle verzweigt sich eine Produktentwicklung oft in parallele Entwicklungslinien, in denen einzelne Module im Wesentlichen parallel und getrennt voneinander, aber zugleich auch untereinander koordiniert entwickelt werden (siehe Abschnitt 4.3).

4.2.2.6 Gestalten der Module

Die Aktivität „Gestalten der Module“ führt zu einem wichtigen Konkretisierungs- bzw. Realisierungssprung durch das Detaillieren der für die Produkt- bzw. Systemoptimierung maßgebenden Module. Hierbei hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Konkretisierungs- und Vollständigkeitsgrad der geometrischen, stofflichen und/oder informationstechnischen Festlegungen nur so weit zu treiben, dass ein Erkennen und Auswählen eines Gestaltungsoptimums möglich werden. Es wird hierbei auch von einem Vorgestalten oder Grobgestalten gesprochen.

Auch diese Aktivität kann für einzelne Module getrennt erfolgen.

Arbeitsergebnis sind Vorentwürfe für die maßgebenden Module, die als grobe maßstäbliche Zeichnungen, CAD-Modelle, Stromlaufpläne, Datenmodelle, Programmablaufpläne u. Ä. dargestellt sein können.

4.2.2.7 Integrieren des gesamten Produkts

Im Rahmen der Integration werden die bereits vorentworfenen Module durch weitere Detailangaben, durch Gestalten und Ergänzen noch nicht bearbeiteter Gruppen und Elemente sowie durch Verknüpfen aller Gruppen und Teile endgültig festgelegt und zu einem Produkt zusammengeführt.

Es wird bei diesem Abschnitt auch von einem „Endgestalten“ oder „Feingestalten“ gesprochen. Insbesondere die Festlegung der in früheren Aktivitäten noch nicht realisierten Module ist durch Auswahl bekannter bzw. handelsüblicher Elemente wie Normteile oder Standardkomponenten möglich.

Arbeitsergebnis ist ein Gesamtentwurf, der alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen zur Produktrealisierung enthält. Darstellungsformen sind vor allem maßstäbliche Zeichnungen, ausgearbeitete CAD-Modelle, vorläufige Stücklisten, Instrumentenfließbilder u. Ä.

4.2.2.8 Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

Das Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben überlappt insofern mit vorhergehenden

matic considerations (mechatronic systems).

At this point, product design often branches into parallel lines in which individual modules are mainly designed in parallel and separate from one another while simultaneously being coordinated with each other (see Section 4.3).

4.2.2.6 Designing the modules

The activity “designing the modules” leads to an important jump in concretisation or implementation as a result of the detailed description of the modules crucial for product and system optimisation. It has proved practical here to only further the degree of concretisation and completeness of the definitions with regard to geometry, material or information technology to the extent that it becomes possible to identify and select an optimum design. We also speak of “preliminary design” or “rough design” here.

This activity can be performed separately for individual modules too.

The results of the work are preliminary designs for the principal modules which can be displayed in the form of rough scale drawings, CAD models, circuit diagrams, data models, program flowcharts, etc.

4.2.2.7 Integrating the product as a whole

As part of integration, the modules already subjected to preliminary design are finally defined by designing and supplementing as yet unprocessed groups and elements and linking all groups and parts, after which they are merged to form a product.

This phase is also known as “fine design” or “final design”. In particular, the definition of the modules not yet implemented in earlier activities is possible by selecting well-known off-the-shelf elements such as standard parts or standard components.

The work result is an overall design containing all principal definitions with regard to design, which are necessary for realising the product. Types of display used are above all scale drawings, elaborated CAD models, provisional parts lists, instrument flow charts, etc.

4.2.2.8 Elaborating the details of execution and use

The elaboration of the details of execution and use overlaps with previous activities because important

Aktivitäten, weil in diesen Aktivitäten bereits wesentliche Festlegungen zur fertigungstechnischen Realisierung sowie zum Produktgebrauch getroffen wurden.

Arbeitsergebnis ist die Produktdokumentation mit Herstellungs-, Nutzungs- und Zertifizierungsangaben, z.B. in Form von technischen Zeichnungen, CAD-Modellen, Programmcode-Dokumentationen, Stücklisten, Fertigungs-, Montage-, Prüf- und Transportvorschriften, Betriebsanleitungen oder Benutzerhandbüchern, Recycling- und Entsorgungsanleitungen. An dieser Stelle sei auf die Bedeutung des Änderungswesens hingewiesen, das je nach Änderungsnotwendigkeiten auch in anderen Aktivitäten stattfinden muss. Rationale Änderungsmöglichkeiten, insbesondere durch Rechnerunterstützung, sind für die Kosten und den Zeitablauf in Produktentwicklung und Fertigung besonders wichtig.

4.2.2.9 Absichern der Anforderungserfüllung

Unter dem Begriff der „Absicherung der Anforderungserfüllung“ fallen alle Aktivitäten der Analyse, die zum Abgleich von Ergebnis und Ziel (bzw. den Anforderungen) kontinuierlich als einer der wesentlichen Bestandteile der Produktentwicklung durchgeführt werden.

Darunter fallen alle Berechnungs-, Simulations-, Versuchs- und Testaktivitäten eines Entwicklungsprojekts von der Materialerprobung bis hin zu Versuchen oder Dauerlauftests. Dabei kann zusätzlich zwischen der Verifikation und der Validierung unterschieden werden. Unter Verifikation ist die Analyse zu verstehen, ob eine Realisierung mit den Anforderungen in der Spezifikation übereinstimmt. Unter Validierung ist hingegen die Analyse zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den Bedarf und Nutzen aus Sicht der Stakeholder auch wirklich erfüllt (siehe VDI 2206).

Bei der Validierung müssen sowohl Ergebnisse als auch Ziele den eigentlichen Bedarfen und den zukünftigen Anwendungsfällen gegenübergestellt werden. Hierfür sind die Einflüsse der Stakeholder und die Umgebung des Produkts oder seiner Teile in Form von geeigneten Modellen abzubilden. Ein Ansatz hierzu in der Forschung und Anwendung ist „X-in-the-Loop“ [25].

Die verwendeten Modelle können je nach Validierungszweck und Reifegrad – wie auch das zu untersuchende System selbst – in physischer (Prototyp) oder virtueller Form (Simulationsmodell) vorliegen.

Häufig vorkommende Mischformen werden als gemischt physisch-virtuelle Absicherung bezeichnet.

definitions concerning use of the product and implementation from a manufacturing point of view were already made in those activities.

The work result is the product documentation with details on manufacture, use and certification, for example in the form of technical drawings, CAD models, program code documentations, parts lists, manufacturing, assembly, testing and transport regulations, operating manuals, user handbooks and recycling and disposal guidelines. The importance of change management is pointed out here. Depending on the changes required, it shall take place in other activities too. Rational change options, in particular using computer support, are especially important for the costs and the time schedule in product design and manufacture.

4.2.2.9 Assurance of the fulfilment of the requirements

The term “assurance of the fulfilment of the requirements” includes virtually all analysis activities, which are constantly performed in order to compare the result with the objective (or the requirements), and is one of the essential components of product design.

It includes all calculation, simulation, experimental, and testing activities of a design project, from materials testing to experiments or durability tests. An additional distinction can be made between verification and validation. Verification is the analysis as to whether an implementation matches the requirements expressed in the specification. In contrast, validation is the analysis as to whether the product is suitable for its intended purpose, i.e. whether it really meets the requirements and provides the intended benefits from the viewpoint of the stakeholders (see VDI 2206).

In validation, results as well as objectives shall be compared with the actual requirements and the future applications. The surroundings of the product or its parts and the influence of the stakeholders are to be mapped using suitable models. An approach to this, which is often used in research and practice, is “X-in-the-Loop” [25].

Like the system to be tested, the models used can be present in physical form (prototype) or virtual form (simulation model) depending on the purpose of validation and the degree of maturity.

Widespread mixed forms are known as “physical/virtual assurance”. Assurance takes place con-

net. Dabei findet die Absicherung kontinuierlich im Entwicklungsprozess statt und detailliert zugleich auch die Ziele und Anforderungen. Häufig werden durch die Erkenntnisse aus der Absicherung zudem auch neue Entwicklungsaktivitäten initiiert, wodurch die Absicherung eine zentrale Aktivität der Produktentwicklung darstellt.

4.3 Aktivitäten in Wechselwirkung mit der Produktentwicklung

Abschnitt 4.2 beschreibt ein allgemeines Produktentwicklungsmodell und die wesentlichen Aktivitäten und Ergebnisse, die im Laufe eines Produktentwicklungsprojekts von Bedeutung sein können.

Neben diesen projektbezogenen Aktivitäten sind meist weitere unterstützende Elemente erforderlich, um eine Produktentwicklung sowohl im Rahmen eines Prozesses als auch innerhalb einer Organisation zum Erfolg zu führen.

Diese Elemente werden im Folgenden kurz dargestellt.

Bild 12 zeigt im Zentrum die projektbezogenen Kernaktivitäten des allgemeinen Produktentwicklungsmodells.

Diese werden ergänzt durch:

- Design to/for X fokussiert auf besondere Restriktionen, Nebenbedingungen oder Entwicklungsziele, die während der Entwicklung neben der reinen Funktionserfüllung als zusätzliche Anforderungen zu berücksichtigen sind. Für weitere Ausführungen siehe Abschnitt 4.3.1.
- Begleitaktivitäten stellen im weiteren Sinne ebenfalls projektbezogene Aktivitäten dar. Als Komponenten der operativen Ablauforganisation bilden sie den prozessbegleitenden Rahmen für die Kernaktivitäten des Produktentwicklungsmodells. Hierzu zählen insbesondere das Projektmanagement, Änderungsmanagement, Konfigurationsmanagement, Qualitätsmanagement und Kostenmanagement, siehe Abschnitt 4.3.2.
- Querschnittsaktivitäten stellen projektunabhängige oder -übergreifende Aktivitäten in einer Produktentwicklungsorganisation dar. Als Komponenten der strategischen Ablauforganisation bilden sie den grundlegenden Rahmen der Produktentwicklung. Hierzu zählen das Prozessmanagement, Variantenmanagement, Wissensmanagement, Technologiemanagement und Innovationsmanagement, siehe Abschnitt 4.3.3.

stantly within the design process while also specifying the objectives and requirements. The knowledge gained from assurance often initiates new design activities, thus making assurance one of the core activities of product design.

4.3 Activities in interaction with product design

Section 4.2 describes a general model of product design and the principal activities and results, which can be of importance in the course of a product design project.

Besides these project-related activities, further supporting elements are usually necessary in order to make product design a success in the context of a process and within an organisation.

These elements are described in brief in the following.

Figure 12 shows the project-related core activities of the general product design model.

These are supplemented as follows:

- Design to/for X focuses on special restrictions, secondary conditions or design objectives, which are to be taken into account during design in addition to the pure fulfilment of functions. See Section 4.3.1. for more details.
- In a wider sense, supporting activities are also part of project-related activities. All components of operational process organisation form the process-supporting framework for the core activities of the product design model. These include in particular project management, change management, configuration management, quality management and cost management, see Section 4.3.2.
- Cross-cutting activities are project-independent or cross-project activities performed within project design organisation. As components of strategical process organisation, they form the fundamental framework of product design. They include process management, variant management, knowledge management, technology management and innovation management, see Section 4.3.3.

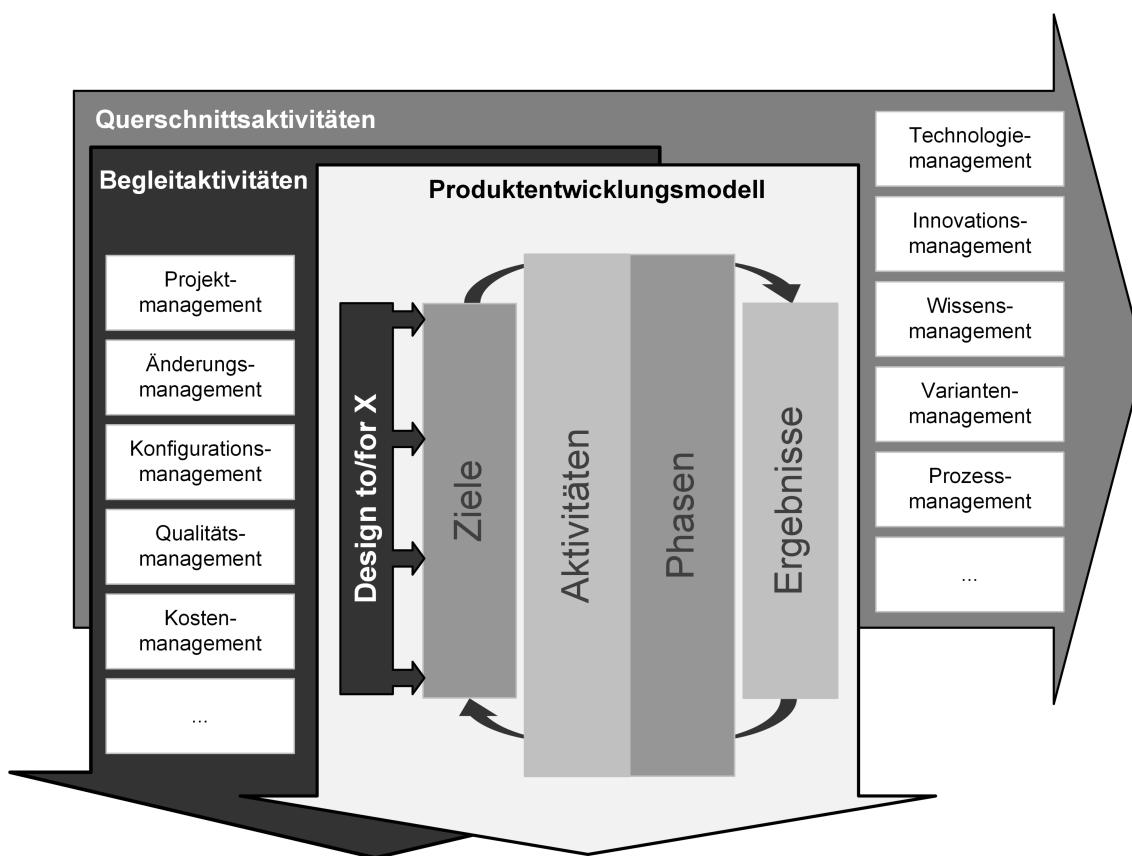


Bild 12. Unterstützende Elemente der Produktentwicklung

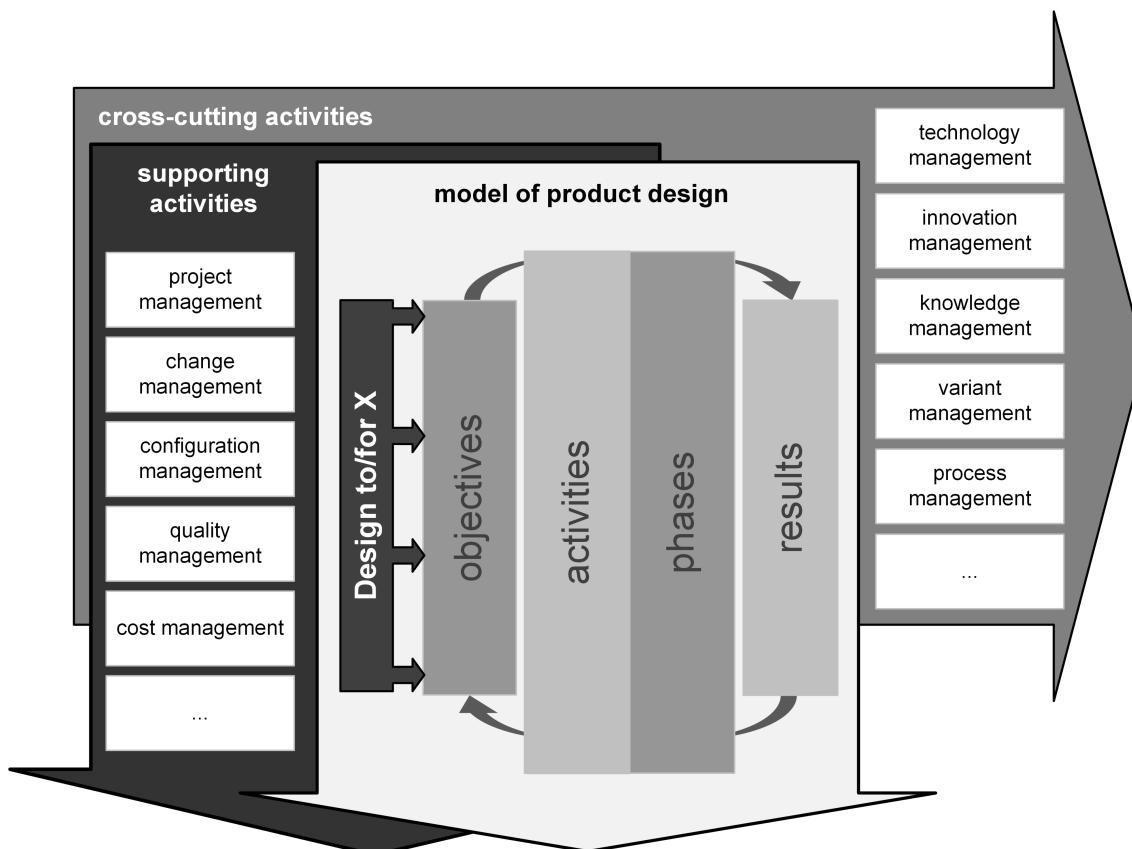


Figure 12. Supporting elements of product design

4.3.1 Design to/for X

Das in Abschnitt 4.2 vorgestellte generelle Vorgehen unterliegt in der Anwendung einer Vielzahl von Einflüssen und Entwicklungsz Zielen, die neben den Hauptzielen Qualität, Kosten und Zeit stehen bzw. diese konkretisieren. Derartige Restriktionen werden oft durch sogenannte „Design-to-X“- oder „Design-for-X“-Prinzipien adressiert und neben die Hauptziele gestellt. Das „X“ beschreibt dabei das jeweilige Entwicklungsziel (z.B. Bewertungskriterium, gegebenenfalls Gruppe von Soll-Eigenschaften). Hubka [50] definiert „Design for X“ als Wissenssystem, in dem die Erkenntnisse, wie einzelne Eigenschaften technischer Systeme beim Konstruieren zu erreichen sind, gesammelt und geordnet werden.

„Design-to-X“-Prinzipien sind in der Regel auf Schwerpunktziele des Entwicklungsprozesses selbst (z.B. Design to Safety) gerichtet, während „Design-for-X“-Prinzipien Folgeeffekte oder -prozesse des Entwicklungsprozesses adressieren (z.B. Design for Manufacturing; Design for Assembly).

Jedes dieser Entwicklungsprinzipien wird beschrieben durch Richtlinien und Methoden, die entlang des Entwicklungsprozesses (auch im Sinne von Begleitaktivitäten gemäß Abschnitt 4.3.2) zur Anwendung kommen können, und bildet somit ergänzende Sichten auf das beschriebene generelle Vorgehen. Die Wichtigkeit der einzelnen Entwicklungsziele hängt von der jeweiligen Entwicklungs aufgabe und ihren Kontextfaktoren ab (Abschnitt 4.1.1). So wird insbesondere bei Neuentwicklungen zunächst ein Fokus auf die Funktionserfüllung gelegt, während andere „Design-for/to-X“-Prinzipien wie Kosten oder Gewicht erst nachträglich optimiert werden.

Eine besondere Herausforderung stellt die in der Regel erforderliche Kombination mehrerer Entwicklungsprinzipien dar, denn die entsprechenden Richtlinien oder Methoden können zu sich einander widersprechenden Anforderungen führen (Zielkonflikte). Zudem sind die Entwicklungsprinzipien insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklung zu berücksichtigen, in denen die Einflussmöglichkeiten auf die Produktlösungen und -kosten am größten sind. Simultaneous-Engineering-Konzepte (Abschnitt 4.1.3) müssen die organisatorischen Randbedingungen dazu bereitstellen, beispielsweise durch Simultaneous-Engineering-Teams oder -Workshops.

Tabelle 3 fasst wesentliche Entwicklungsziele und -prinzipien zusammen und gibt Hinweise auf weiterführende Richtlinien oder Literatur.

4.3.1 Design to/for X

The general procedure presented in Section 4.2 is subject to a wide range of influences and design objectives during application. These are secondary to the main objectives of quality, costs and time or make them more concrete. Restrictions of this kind are often addressed using so-called “Design to X” or “design for X” principles and are treated as secondary to the main objectives. The “X” describes the design objective in each case (for example an assessment criterion) and a group of target properties if applicable). Hubka [50] defines “Design for X” as “a system of knowledge in which the know-how necessary to achieve certain properties of technical systems during the design process is collected and structured.

“Design to X” principles are usually directed towards principal objectives of the design process itself (e.g. Design to Safety), whereas “Design for X” principles address follow-on effects or processes belonging to the design process (e.g. Design for Manufacturing; Design for Assembly).

Each of these design principles is described by standards and methods which can be used throughout the design process (including supporting activities according to Section 4.3.2) and thus represents additional views of the general procedure described. The importance of the individual design objectives depends on the design task and its contextual factors in each case (Section 4.1.1). Thus, in particular with new developments, the fulfilment of the functions is focused on first, whereas other “Design-for/to-X” principles such as costs or weight are not optimised until afterwards.

A special challenge is posed by the usually necessary combination of several design principles, for the relevant standards or methods can lead to conflicting requirements (conflicts of objectives). Also, the design principles are to be taken into account in the early phases of development in particular as this is where most options for influencing the product solutions are to be found. Simultaneous engineering concepts (Section 4.1.3) have to provide the basic organisational conditions for this, for example via simultaneous engineering teams or workshops.

Table 3 sums up important design objectives and principles and points to further standards or literature.

Tabelle 3. Design to/for X in Wechselwirkung mit der Produktentwicklung

„Design to/for X“-Prinzipien und Kurzbeschreibung	Quellen
Design for Manufacture beschreibt die fertigungsgerechte Produktgestaltung, die Belange aller Bereiche berücksichtigt, welche die Teile und Baugruppen bis zur Montagereife vorbereiten [53].	[17; 20]
Design for Manufacture kann mit Design for Assembly zu Design for Manufacture and Assembly zusammengefasst werden. In der Praxis wird DFMA oft als bedeutendstes „Design for X“-Prinzip gesehen [53].	
Design for Assembly beschreibt die montagegerechte Produktgestaltung, bei der Produkte bereits in frühen Entwicklungsphasen so gestaltet werden, dass sie mit minimalem Montageaufwand bei gleichzeitig minimalen Herstellkosten hergestellt werden können [53].	[17; 20; 54; 55]
Design to Ergonomics beschreibt die ergonomiegerechte Produktgestaltung, die auf eine eigenschafts-, fähigkeits-, fertigkeits- und bedürfnisgerechte Ausgestaltung der Beziehungen zwischen Mensch und technischem Erzeugnis durch konstruktive Maßnahmen zielt [56].	VDI 2242
Design to Safety beschreibt die sicherheitsgerechte Produktgestaltung, gegebenenfalls auch im Sinne geltender Rechts- und sonstiger Vorschriften [57].	DIN 31000, VDI 2244
Design for Maintenance beschreibt die Gestaltung instandhaltungs- und servicegerechter Produkte.	VDI 2246 Blatt 1 und Blatt 2
Design for Recycling zielt auf eine recyclinggerechte Produktgestaltung und trägt damit der steigenden Bedeutung von Lebenszyklusaspekten und Ressourcenschonung Rechnung.	VDI 2243
Design for Six Sigma zielt auf eine strukturierte Vorgehensweise und Methodenanwendung in der Produktentwicklung mit dem Ziel, durch präventive Maßnahmen fehlerfreie Produkte sicherzustellen.	[20]

Table 3. Design to/for X in interaction with product design

“Design to/for X” principles and brief descriptions	Sources
Design for Manufacture takes into account the interests of all areas which prepare the parts and models in the run-up to assembly maturity [53].	[17; 20]
Design for Manufacture consists of Design for Assembly and Design for Manufacture and Assembly . In practice, DfMA is often considered as the most important Design for X principle [54].	
Design for Assembly describes a product design process which takes the interests of assembly into account. Even in early design phases, this principle ensures that products are designed in a way allowing them to be manufactured with minimal assembly effort at minimal manufacturing costs [53].	[17; 20; 54; 55]
Design to Ergonomics describes a product design process which takes the interests of ergonomics into account. This principle ensures that design measures shape the relations between technical product and human being in a way which does justice to the properties, skills and needs of the latter. [56].	VDI 2242
Design to Safety describes a product design process which takes safety interests into account, if necessary, also according to applicable legal and other regulations [57].	DIN 31000, VDI 2244
Design for Maintenance describes a product design process which takes the interests of maintenance and servicing into account.	VDI 2246 Part 1 and Part 2
Design for Recycling aims at a product design process which takes the interests of recycling into account, thus doing justice to the increasing importance of lifecycle aspects and the sparing use of resources.	VDI 2243
Design for Six Sigma aims at a structured procedure and the application of methods in product design with the objective of ensuring that products are free from defects.	[20]

Zusätzlich zu den „Design for/to X“-Ansätzen“ hat das Industriedesign allgemein bei immer mehr Produkten großen Einfluss auf die Anforderungen, Aktivitäten und Ergebnisse der Produktentwicklung.

Viele Einflüsse auf das Produkt ergeben sich nicht ausschließlich bzw. nicht direkt aus den technischen oder wirtschaftlichen Entwicklungszielen,

In addition to the “Design for/to X” approaches, industrial design generally has a great influence on the requirements, activities and results of product design.

Many of the influences on the product do not result exclusively from the technical or economic design objectives, but in particular from the physical, psy-

sondern insbesondere aus den physischen, psychischen oder sozialen Bedürfnissen von Menschen/Nutzern [51].

In der Umsetzung ergonomischer oder formalästhetischer Entwicklungsziele berücksichtigen Industriedesigner insbesondere die Mensch-Maschine-Schnittstelle und dabei z.B. auch gezielt die Altersgruppe, das Geschlecht, die Kultur oder Historie verschiedener Stakeholder. Sie steigern somit die Qualität des Produkts mit einer ganzheitlichen, insbesondere auf den Menschen und seine Bedarfe ausgerichteten Sicht auf das Produkt (siehe VDI/VDID 2424).

Industriedesigner müssen deshalb möglichst früh in den Produktentwicklungsprozess eingebunden werden. Ihre über weite Teile des Entwicklungsprozesses überlappenden und im Vergleich zum Ingenieur oftmals auch ähnlichen Aktivitäten erfordern darüber hinaus eine kontinuierliche und intensive Abstimmung des Vorgehens in der gesamten Produktentstehungsphase [52].

4.3.2 Begleitaktivitäten

Das in Abschnitt 4.2 beschriebene allgemeine Modell der Produktentwicklung umfasst den operativen Kernentwicklungsprozess eines Produkts mit Aktivitäten vom Klären und Präzisieren des Problems als Eingangsinformation der Produktplanung bis zur Produktionsfreigabe.

Begleitend zu diesem Kernprozess sind jedoch weitere projektbezogene Begleitaktivitäten erforderlich, um ein Entwicklungsprojekt hinsichtlich seiner Vielzahl an Zielen (siehe Abschnitt 3.4) erfolgreich abzuwickeln. Hierbei ist Kommunikation und Teamwork ein zentrales Element (siehe Abschnitt 3.2.3).

So unterscheidet die ISO/IEC/IEEE 15288 im Systems Engineering ca. 30 Teilprozesse in den Prozessgruppen *Technische Prozesse*, *Technische Managementprozesse*, *Organisatorische Projektunterstützungsprozesse* und *Vertragsprozesse*, von denen sich die frühen technischen Teilprozesse mit dem Kernentwicklungsprozess aus Abschnitt 4.2 überdecken.

Die darüber hinausgehenden technischen Teilprozesse adressieren über den Rahmen dieser Richtlinie hinausgehende Lebenszyklusphasen, während Teilprozesse der weiteren Prozessgruppen im Wesentlichen Begleitprozesse im Sinne dieses Abschnitts darstellen.

Tabelle 4 stellt wesentliche projektbezogene Begleitaktivitäten dar und gibt Hinweise auf weiterführende Richtlinien oder Literatur.

chological or social needs of persons/users [51].

When implementing ergonomic or formally aesthetic design goals, industrial designers take in particular the operator-equipment interface into account. This also specifically includes the age group, gender, culture or history of different stakeholders. In this way, they increase the quality of the product using a holistic view of it which above all addresses human beings and their needs (see VDI/VDID 2424).

Industrial designers therefore have to be included in the product design process at as early a stage as possible. Their activities overlap throughout large parts of the design process and are often similar to those performed by engineers. They also require constant intensive coordination of the procedure in the phase of product creation as a whole [52].

4.3.2 Supporting activities

The general model of product design described in Section 4.2 comprises the operational design process for a product with activities ranging from clarifying and itemising the problem as input information for product planning up until production release.

However, further project-related activities are required to accompany this process and successfully handle a design project in terms of its wide range of objectives (see Section 3.4). Communication and teamwork are central elements here (see Section 3.2.3).

In systems engineering, therefore, ISO/IEC/IEEE 15288 distinguishes between around 30 subprocesses in the process groups *Technical Processes*, *Technical Management Processes*, *Organisational Product Support Processes* and *Contractual Processes*. Of these, the early technical processes correspond with the core design process described in Section 4.2.

The technical subprocesses which go beyond this address lifecycle phases which extend beyond the framework of this standard, whereas subprocesses of the other process groups are mainly accompanying processes as defined in this section.

Table 4 sums up important project-related design objectives and points to further standards or literature.

Tabelle 4. Begleitaktivitäten in Wechselwirkung mit der Produktentwicklung

Begleitaktivität und Kurzbeschreibung	Quellen
Projektmanagement ist in der DIN 69901 als Gesamtheit von Führungsaufgaben, der Projektorganisation, der Techniken und der Mittel für die Abwicklung eines Projekts definiert. In der Produktentwicklung befasst sich Projektmanagement entsprechend mit den organisatorischen Aspekten eines Projekts (z. B. Aufbauorganisation, Ablauforganisation, Projektcontrolling).	DIN 69901-1, ISO/IEC/IEEE 16326, [11]
Änderungsmanagement umfasst nach DIN 69901 allgemein die Organisation, Verwaltung und Abwicklung von Änderungsanträgen während des Projektverlaufs. In der Produktentwicklung beschreibt Änderungsmanagement Funktionen und Prozesse, die in einer Organisation etabliert werden, um Änderungen an Produkten der Organisation kontrolliert und dokumentiert vorzunehmen.	DIN 69901-1
Konfigurationsmanagement ist in der DIN ISO 10007 als eine Managementtätigkeit definiert, die die technische und administrative Leitung des gesamten Produktlebenszyklus, der Konfigurationseinheiten des Produkts und der produktkonfigurationsbezogenen Angaben übernimmt. In der Anwendung beinhaltet Konfigurationsmanagement sowohl Teile des Varianten- als auch des Änderungsmanagements.	DIN ISO 10007
Qualitätsmanagement ist in der DIN EN ISO 9000 Qualitätsmanagement allgemein definiert als aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich Qualität. In der Produktentwicklung befasst sich Qualitätsmanagement entsprechend mit dem Einsatz von qualitätsorientierten Methoden und Werkzeugen in Entwicklungsprojekten.	[20], DIN EN ISO 9000
Kostenmanagement beschreibt allgemein einen Managementprozess, in dem insbesondere die Kosten in einem Unternehmen analysiert und zielgerichtet beeinflusst werden. In der Produktentwicklung werden in der Regel 70 % bis 80 % der Produktkosten festgelegt [18]. Daher ist Kostenmanagement hier von besonderer Bedeutung.	VDI 2234, VDI 2235, [18]

Table 4. Accompanying activities interacting with product design

Accompanying activity and short description	Sources
DIN 69901 defines project management as the totality of management tasks, organisation, techniques and tools required for handling a project. Similarly, in project design, change management deals with the organisational aspects of a project (e.g. structural organisation, process organisation, project controlling).	DIN 69901-1, ISO/IEC/IEEE 16326, [11]
According to DIN 69901, change management generally includes the organisation, administration and handling of change requests during the project procedure. In product design, change management describes functions and processes, which are established in an organisation in order to carry out changes to products of this organisation in a controlled and documented way.	DIN 69901-1
DIN ISO 10007 defines configuration management as a management activity, which takes care of the technical and administrative management of the entire product lifecycle, the configuration units of the product and the product-configuration-specific data. In application, configuration management includes elements of variant management as well as change management.	DIN ISO 10007
DIN EN ISO 9000 generally defines quality management as coordinated activities for managing and controlling an organisation in terms of quality. As a result, within product design, quality management deals with the use of quality-based methods and tools in design projects.	[20], DIN EN ISO 9000
Cost management generally describes a management process in which in particular the costs in a company are analysed and influenced in a targeted way. 70 % to 80 % of the product costs are usually determined in product design [18]. For this reason, cost management is of particular importance here.	VDI 2234, VDI 2235, [18]

4.3.3 Querschnittsaktivitäten

Neben dem operativen und auftragsbezogenen Kernentwicklungsprozess nach Abschnitt 4.2 und den ebenfalls operativen und auftragsbezogenen

4.3.3 Cross-cutting activities

Besides the operative and order-specific core design process as defined in Section 4.2 and the also operational and order-specific accompanying activ-

Begleitaktivitäten nach Abschnitt 4.3.1 sind weitere (auftragsunabhängige bzw. -übergreifende) Aktivitäten erforderlich, um Produktentwicklungsorganisationen strategisch zu entwickeln und Produktentwicklungsprojekte entsprechend dauerhaft erfolgreich zu gestalten. Diese Querschnittsprozesse gestalten die Rahmenbedingungen einer Produktentwicklungsorganisation.

So finden die operativ geprägten Projekt-, Änderungs- und Qualitätsmanagementaktivitäten hier im Prozessmanagement ihre strategische Entsprechung. Der operativen auftragsbezogenen Gestaltung und Integration von Modulen gemäß Abschnitt 4.2 und dem diesbezüglichen Konfigurationsmanagement gemäß Abschnitt 4.3.1 ist ein strategisches Variantenmanagement zur Seite zu stellen.

Eine weitere wichtige Querschnittsaktivität stellt das Wissensmanagement dar: In wissensorientierten Ansätzen z. B. des Lean Product Development tritt der Wissenswertstrom als gleichberechtigte Säule einer Entwicklungsorganisation neben den Produktwertstrom, die Mehrung des Produktentwicklungswissens entsprechend als Ziel neben den Erfolg von Produktentwicklungsprojekten. Ausprägungen des Wissensmanagements stellen auch die Bereiche des Technologie- und Innovationsmanagements dar, die die Grundlage für zukünftige Produktplanungen bilden.

Tabelle 5 fasst die wesentlichen strategischen Querschnittsaktivitäten zusammen und gibt Hinweise auf weiterführende Richtlinien oder Literatur.

ties according to Section 4.3.1, further activities (of an order-independent or cross-order nature) are necessary in order to develop product design organisations in a strategic way and develop product design projects which are successful in the long term. These cross-cutting processes shape the basic conditions of a product design organisation.

In this way, the operationally characterised project, change and quality management activities find their strategic counterpart in process management. The operational order-specific designing and integration of modules according to Section 4.2 and the relevant configuration management according to Section 4.3.1 are to be accompanied by strategic variant management.

Knowledge management is another important cross-cutting activity: in knowledge-based approaches, for example those belonging to Lean Product Development, the knowledge value stream accompanies the product value stream as an equally important pillar of design organisation, just as the objective of increasing the product design stream accompanies the success of product design projects. The areas of technology and innovation management which form the basis for future product planning are also manifestations of knowledge management.

Table 5 sums up the principal cross-cutting activities and gives hints as to further standards or literature.

Tabelle 5. Querschnittsaktivitäten in Wechselwirkung mit der Produktentwicklung

Querschnittsaktivität und Kurzbeschreibung	Quellen
Technologiemanagement umfasst die Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung und Anwendung von (neuen) Technologien zur Schaffung erfolgswirksamer Wettbewerbsvorteile.	[53]
Innovationsmanagement umfasst die systematische Planung, Steuerung und Kontrolle von neuen Ideen oder Erfindungen mit hohem Innovationspotenzial in Organisationen und damit die Überführung von Technologien und Produktideen in erfolgreiche Produkte auf dem Markt.	DIN CEN/TS 16555-1
Prozessmanagement beschäftigt sich allgemein mit der Identifikation, Gestaltung, Dokumentation, Implementierung, Steuerung und Verbesserung von Geschäftsprozessen. In der Produktentwicklung sind entsprechend – auch als Teil eines Qualitätsmanagementsystems – Entwicklungsabläufe zu definieren und zu beschreiben, die die Basis für Projektmanagementsysteme und Meilensteinpläne (oft auch Produktentwicklungssysteme genannt) darstellen können.	[24]
Variantenmanagement beschreibt das aktive und übergreifende Gestalten der Produktarchitektur und der variablen technischen Ausprägung von Produkten oder Produktpportfolios . Ziel ist die ein oder mehrere Produkte übergreifende Definition und gegebenenfalls die Standardisierung von Produktbestandteilen durch Baukasten-, Plattform- und Baureihenprinzipien .	[26; 58]
Wissensmanagement wird in der Richtlinie VDI 5610 definiert als das Organisieren aller Prozesse, in denen Informationen, Erkenntnisse und Erfahrungen identifiziert, erzeugt, gespeichert, verteilt und angewendet werden. In der Produktentwicklung sind entsprechend alle auftragsbezogenen und -übergreifenden Informationen im Fokus des Wissensmanagements.	VDI 5610

Table 5. Cross-cutting activities in interaction with product design

Cross-cutting activity and short description	Sources
Technology management includes the planning, execution and verification of the design and application of (new) technologies in order to create competitive advantages with an effect on success.	[53]
Innovation management includes the systematic planning, control and verification of new ideas or inventions with a high innovation potential in organisations and thus the implementation of technologies and product ideas in the form of successful products in the marketplace.	DIN CEN/TS 16555-1
Process management generally deals with the identification, shaping, documentation, implementation, control and improvement of business processes. As a result, product design – including when it is part of a quality management system – shall define and describe design procedures which can form the basis for project management systems and gate schedules (often also known as product design systems).	[24]
Variant management describes the active and comprehensive shaping of the product architecture and the variable manifestations of products or product portfolios . The objective here is to define and if necessary, standardise product components by means of modular , platform and series construction .	[26; 58]
The standard VDI 5610 defines knowledge management as the organising of all processes in which information, knowledge and experience are identified, generated, stored, distributed and used. As a result, knowledge management focuses on all order-specific and cross-order information.	VDI 5610

5 Methoden

Der Begriff „Methode“ beschreibt nach VDI 2223 ein planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines vorher definierten Ziels. Die Forschung bietet Produktentwicklern eine beständig wachsende Zahl an Methoden an. Der Methodenbegriff wird in der Literatur häufig als ein regelbasierter und geplanter Ablauf von Aktivitäten verstanden [6]. Methoden können somit als die Abfolge chronologisch ablaufender Elemente aufgefasst werden, die eine gewisse Vorgehensweise beschreiben, um ein gegebenes Problem Schritt für Schritt zu lösen [8]. Um Entwickler bei der Erfüllung der vorliegenden Anforderungen zu unterstützen, werden Methoden eingesetzt, die zur Verbesserung des Produkts und des Produktentstehungsprozesses führen [9]. Indem Methoden Handlungsschritte nach bestimmten Regeln vereinheitlichen [18], können sie den Entwicklungsprozess in mehrfacher Hinsicht unterstützen. Der Einsatz geeigneter Methoden bewirkt einerseits die Strukturierung der einzelnen Aktivitäten, wodurch die jeweiligen Ergebnisse nachvollziehbar werden. Zum anderen wird durch den Einsatz geeigneter Methoden Transparenz geschaffen. Zusätzlich können Methoden auch die Kreativität anregen [42].

Jede Aktivität im Rahmen der Produktentstehung verfolgt bestimmte Ziele. Methoden sind Hilfsmittel, die diese Zielerreichung unterstützen [8]. Entsprechend muss die Auswahl einer Methode jeweils aufgabenspezifisch abgestimmt werden [11]. Die Menge von Methoden in der Produktentwicklung lässt sich unter anderem hinsichtlich der Ziele gliedern, deren Erreichung sie unterstützen. *Pahl*

5 Methods

According to VDI 2223, the term “method” describes a systematic procedure for achieving a previously defined objective. Research provides product designers with a constantly growing range of methods. In the literature, the term “method” is often understood to mean a systematic rule-based sequence of activities [6]. Methods can thus be understood as a chronological sequence of elements describing a certain procedure for solving a given problem step by step [8]. To support developers in meeting the existing requirements, methods are used which lead to the improvement of the product and the process of product creation [9]. Methods can support the design process in several ways by standardising action sequences according to certain rules [18]. On the one hand, the use of suitable methods structures the individual activities and makes the results more comprehensible in each case. On the other hand, the use of suitable methods creates transparency. Methods can stimulate creativity too [42].

Every activity performed as part of product design pursues certain objectives. Methods are instruments which support this achievement of objectives [8]. Accordingly, the selection of a method shall be coordinated task-specifically [11]. The set of methods to be found in product design can for example be structured with regard to the objectives whose achievement they support. *Pahl and Beitz*

und *Beitz* [21] unterteilen Methoden in allgemein einsetzbare Lösungs- und Beurteilungsmethoden, Methoden zur Produktplanung und Aufgabenklärung, Methoden zum Konzipieren, zum Entwerfen, zum Ausarbeiten und zur qualitätssichernden Produktentwicklung.

Es gibt diverse Arbeiten, in denen Methodensammlungen aufbereitet sind. Hier wird exemplarisch auf die Richtlinie VDI 2223, Methodenhandbücher (z.B. [6; 18; 21; 56]) und digitale Anwendungen nach DIN 31000 verwiesen.

6 Rechnerunterstütztes Vorgehen

Produktentstehung ist heute ohne einen umfassenden Einsatz von sich ständig weiterentwickelnder Informations- und Kommunikationstechnik nicht mehr denkbar. Allgemeine Ziele des Rechnereinsatzes im Produktentstehungsprozess sind z.B.:

- eine Beschleunigung des gesamten Produktentstehungsprozesses
- die durchgängige Dokumentation, der rasche Austausch bzw. die einfache Wiederverwendung von Arbeitsergebnissen
- die bessere Nachvollziehbarkeit und Steuerung von Aktivitäten
- die frühe Analyse des Verhaltens von Produkten durch die Nutzung von rechnerunterstützten Berechnungs-/Simulationswerkzeugen
- die Weiterverwendung der Daten in Folgeprozessen, z.B. zur Fertigung mittels CNC- oder Rapid-Prototyping-Verfahren

Zur Realisierung dieser Zielsetzungen finden verschiedene Arten von entwicklungsunterstützenden IT-Werkzeugen Verwendung. Als ein Oberbegriff für viele in der Produktentstehung (sowie teilweise darüber hinaus) eingesetzte Autoren- und Absicherungswerkzeuge wird häufig das Kürzel „CAx“ (Computer Aided) verwendet, wobei „x“ als Platzhalter für einen Begriff der jeweiligen Verwendung steht. Die Grenzen zwischen diesen Werkzeugarten sind heute jedoch meist fließend, da die Werkzeuge immer mehr ineinander integriert werden.

Einige zentrale Werkzeugarten der Produktentwicklung sind in Tabelle 6 dargestellt.

Alle IT-Werkzeuge können im Produktentstehungsprozess nur unterstützend wirken. Es ist stets zu beachten, dass ihre Einführung und ihre effiziente Nutzung nur eingebettet in einem aufgabenangepassten methodischen Gesamtkonzept für die Produktentwicklung möglich sind.

[21] divide methods into generally usable solution-finding and assessment methods, methods of product planning and task clarification, methods of conceiving, designing and elaborating and methods of product design including quality assurance.

Various documents describing methods are available. We refer here to the standard VDI 2223, methodological handbooks (e.g. [6; 18; 21; 56]) and digital applications according to DIN 31000.

6 Computer-assisted procedures

Today, product creation is no longer conceivable without the extensive use of constantly improving information and communication technology. Some general objectives of the use of computers in the process of product creation are for example:

- to speed up of the process of product creation as a whole
- to allow the consistent documentation, rapid exchange or simple reuse of work results
- to better comprehend and control activities
- to allow the timely analysis of products using computer-assisted calculation/simulation tools
- to reuse the data in subsequent activities, for example for manufacture using CNC or rapid prototyping methods

Different types of design-assisting IT tools are used to realize these objectives. The abbreviation “CAx” (computer-aided) is often used as a generic term for many authoring and assurance tools used in product creation (and sometimes in other areas too). “x” is a placeholder for a term indicating the application in each case. However, the boundaries between these types of tools are usually indistinct as the tools are integrating more and more.

Table 6 shows a few of the principal types of tools used in product design.

All IT tools can only have a supporting role within the process of product creation. It is to be observed at all times that they can only be introduced and used efficiently when they are embedded in an overall methodical basic concept of product design.

Tabelle 6. IT-Werkzeuge in der Produktentwicklung

Werkzeugart	Quellen
<p>Autorenwerkzeuge werden im Produktentwicklungsprozess eingesetzt, um grundlegende funktionale, logische, geometrische und technologische produktrelevante Informationen zu erzeugen. Hierzu zählen z. B. Werkzeuge für das Anforderungsmanagement, die Geometriebeschreibung in der Mechanikdomäne (M-CAD) oder der Elektrik/Elektronikdomäne (E-CAD) oder für die Sofwaredomäne (Computer Aided Software Engineering, CASE).</p>	[16; 59]
<p>Absicherungswerkzeuge dienen zur Berechnung und Simulation (Computer Aided Engineering, CAE). Sie werden oft auch zu den Autorenwerkzeugen gezählt bzw. sind direkt darin integriert. Hierzu zählen z. B. Werkzeuge für mechanische oder thermische Berechnungen mittels der Finite Elemente Methode (FEM), für Strömungsberechnungen (Computer Fluid Dynamics, CFD), Mehrkörpersimulationen (MKS) zur Kinematikberechnung oder auch zur Elektronik-/Softwaresimulations (Hardware-in-the-Loop, HiL, sowie Software-in-the-Loop, SiL).</p>	
<p>Datenmanagementwerkzeuge verwalten die erzeugten Daten nah an den Autorenwerkzeugen (Team Data Management, TDM) oder übergreifend (Produktdaten Management, PDM) über den ganzen Lebenszyklus (Produkt Lebenszyklus Management, PLM).</p>	

Table 6. IT tools in product design

Type of tool	Sources
<p>Authoring tools are used in the product design process to generate fundamental functional, logical, geometrical and product-relevant technological information. These for example include tools for requirements management, geometrical description in the mechanical (M-CAD) or electrical/electronic field (E-CAD) or the software field (Computer Aided Software Engineering, CASE).</p>	[16; 59]
<p>Assurance tools are used for calculation and simulation (Computer Aided Engineering, CAE). They are frequently included in the authoring tools and are directly integrated into them. These for example include tools for mechanical or thermal calculations using the Finite Element Method (FEM), fluid calculations (Computer Fluid Dynamics, CFD), multiple-body simulations (MBS) for calculating kinematics or circuitry/software simulation (Hardware-in-the-Loop or HiL and Software-in-the-Loop or SiL).</p>	
<p>Data management tools manage the generated data close to the authoring tools (Team Data Management, TDM) or in an overarching way (Product Data Management, PDM) throughout the entire lifecycle (Product Lifecycle Management or PLM).</p>	

Die bereits im Jahr 1997 von *Spur* und *Krause* formulierte Vision des (vollständig) virtuellen Produkts [60] bzw. der darauf aufbauenden virtuellen Produktentwicklung [29; 61] kann als die möglichst vollständige digitale Repräsentation und Absicherung aller relevanten Eigenschaften eines Produkts ausschließlich mithilfe entsprechender IT-Werkzeuge angesehen werden.

Da die Zusammenhänge in der realen Welt jedoch noch zu komplex sind, um diese heute mit vertretbarem Aufwand vollständig rechnerunterstützt zu beschreiben und abzusichern, kommen auch Zwischenstufen auf dem Weg zur Umsetzung dieser Vision zum Einsatz.

Ein Beispiel ist der sogenannte „X in the Loop“-Ansatz [25], der eine Mischung aus virtuellen und physischen Absicherungsmethoden beinhaltet, die aufgaben- und phasenabhängig auch wechseln können. Die Vielfalt und die Komplexität der Produkteigenschaften sind auch dafür verantwortlich, dass häufig viele verschiedene CAx-Werkzeuge

The vision formulated by *Spur* and *Krause* as far back as 1997 of the (completely) virtual product [60] and/or the virtual product design based on it [29; 61] can be considered as the digital representation and assurance of all relevant properties of a product which only uses the corresponding IT tools and is as complete as possible.

However, as the circumstances in the real world are still too complex to allow them to be described and assured using computer assistance with a reasonable amount of effort, intermediate stages are also used on the way to realising this vision.

One example of these is the so-called “X-in-the-Loop” approach [25], which contains a mixture of virtual and physical methods of assurance which can vary depending on the tasks and phases involved in each case. The variety and complexity of the product properties is also responsible for the fact that it is often necessary to use a large number

eingesetzt werden müssen. Dadurch wird der Austausch von Daten zwischen diesen Werkzeugen zu einem zentralen Thema für eine effektive und effiziente Gestaltung des gesamten Produktentstehungsprozesses.

Eine wichtige Grundlage hierfür ist derzeit z. B. der sogenannte Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) (siehe ISO 10303).

of different CAx tools. This makes the exchange of data between these tools a central topic in terms of the effective and efficient shaping of the entire process of product creation.

An important basis for this is currently for example the so-called “Standard for the Exchange of Product Model Data” (STEP) (see ISO 10303).

Schrifttum / Bibliography

Technische Regeln / Technical rules

DIN 31000*VDE 1000:2017-04 Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten von Produkten (General principles for the safe design of products). Berlin: Beuth Verlag

DIN 69901-1:2009-01 Projektmanagement; Projektmanagementsysteme; Teil 1: Grundlagen (Project management; Project management systems; Part 1: Fundamentals). Berlin: Beuth Verlag

DIN 69901-5:2009-01 Projektmanagement; Projektmanagementsysteme; Teil 5: Begriffe (Project management; Project management systems; Part 5: Concepts). Berlin: Beuth Verlag

DIN CEN/TS 16555-1:2013-09 Innovationsmanagement; Teil 1: Innovationsmanagementsysteme; Deutsche Fassung CEN/TS 16555-1:2013 (Innovation Management; Part 1: Innovation Management System; German version CEN/TS 16555-1:2013). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 8402:1995-08 Qualitätsmanagement; Begriffe (ISO 8402:1994); Dreisprachige Fassung EN ISO 8402:1995 (Quality management and quality assurance; Vocabulary (ISO 8402:1994); Trilingual version EN ISO 8402:1995). Berlin: Beuth Verlag. Zurückgezogen / Withdrawn 2000-12. Nachfolgedokument / Following document DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000:2015-11 Qualitätsmanagementsysteme; Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015 (Quality management systems; Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2015); German and English version EN ISO 9000:2015). Berlin: Beuth Verlag

DIN ISO 10007:2019-04 Qualitätsmanagement; Leitfaden für Konfigurationsmanagement (ISO 10007:2017); Text Deutsch und Englisch (Quality management; Guidelines for configuration management (ISO 10007:2017); Text in German and English). Berlin: Beuth Verlag

DIN ISO 10007:2004-12 Qualitätsmanagement; Leitfaden für Konfigurationsmanagement (ISO 10007:2003) (Quality management systems; Guidelines for configuration management (ISO 10007:2003)). Berlin: Beuth Verlag

ISO 10303-1:1994-12 Industrial automation systems and integration; Product data representation and exchange; Part 1: Overview and fundamental principles (Industrielle Automatisierungssysteme und Integration; Produktdatendarstellung und -austausch; Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien). Genf: ISO

ISO/IEC/IEEE 15288:2015-05 Systems and software engineering; System life cycle processes (System- und Software-Engineering; System-Lebenszyklus-Prozesse). Genf: ISO

ISO/IEC/IEEE 16326*IEEE 1058:2009-12 Systems and software engineering; Life cycle processes; Project management (Software-Engineering; Leitfaden für die Anwendung von ISO/IEC 12207 beim Projektmanagement). Genf: ISO

VDI 1000:2017-02 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen (VDI Standardisation Work; Principles and procedures). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2206:2004-06 (Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (Design methodology for mechatronic systems). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2221 Blatt 2:2019-11 Entwicklung technischer Produkte und Systeme; Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse (Design of technical products and systems; Structuring of individual product development processes). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2222 Blatt 1:1997-06 Konstruktionsmethodik; Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien (Methodic development of solution principles). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2223:2004-01 Methodisches Entwerfen technischer Produkte (Systematic embodiment design of technical products). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2234:1990-01 Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur (Basic economical information for design engineers). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2235:1987-10 Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen (Economical decisions during design engineering process; methods and equipment). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2242:2016-06 (Entwurf / Draft) Ergonomiegerechte Gestaltung technischer Erzeugnisse (Ergonomic design of technical products). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2243:2002-07 Recyclingorientierte Produktentwicklung (Recycling-oriented product development). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2244:1988-05 Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse (Design of safe equipment and machinery). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2246 Blatt 1:2001-03 Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse; Grundlagen (Designing maintainable engineered products; Basic principles). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2246 Blatt 2:2001-03 Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse; Anforderungskatalog (Designing maintainable engineered products; Requirements catalog). Berlin: Beuth Verlag

VDI/VDID 2424 Industriedesign (Industrial Design), in Vorbereitung / in preparation

VDI 2519 Blatt 1:2001-12 Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften (Procedures for the compilation of tender and performance specifications). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2803 Blatt 1:2019-01 Funktionenanalyse; Grundlagen und Methode (Function analysis; Fundamentals and method). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2806:2015-10 Wertanalyse; Kreativitätspotenziale und Ideenfindung (Value analysis; Potentials of creativity and idea generation). Berlin: Beuth Verlag

VDI-MT 2807:2019-01 Teamarbeit; Anwendung in Wertanalyse-/Value-Management-Projekten (Team work; Application in value analysis/value management projects). Berlin: Beuth Verlag

VDI 4520 Blatt 1:2017-01 Produktmanagement; Einführung und Grundlagen (Product management; Introduction and basics). Berlin: Beuth Verlag

VDI 4521 Blatt 1:2016-04 Erfinderisches Problemlösen mit TRIZ; Grundlagen und Begriffe (Inventive problem solving with TRIZ; Fundamentals, terms and definitions). Berlin: Beuth Verlag

VDI 5610 Blatt 1:2009-03 Wissensmanagement im Ingenieurwesen; Grundlagen, Konzepte, Vorgehen (Knowledge management for engineering; Fundamentals, concepts, approach). Berlin: Beuth Verlag

Literatur / Literature

- [1] Heymann, M.: „Kunst“ und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts: Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft. Zürich: Chronos, 2005
- [2] Suh, N. P.: Axiomatic design: Advances and applications. Oxford University Press, 2001

- [3] Gero, J. S.: Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. *AI Mag*, Bd. 11, Nr. 4, S. 26–36, Okt. 1990
- [4] Hatchuel, A.; Weil, B. et al.: A new approach of innovative Design: an introduction to CK theory. In: DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm, 2003
- [5] Albers, A.; Matthiesen, S.; Lechner, G.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. *Konstr.-Z.* für Produktentwicklung, 54 (2002) 7/8, S. 55–60, 2002
- [6] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 2008
- [7] Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, 2016
- [8] Weber, C.; Werner, H.; Deubel, T.: A Different View on PDM and its Future Potentials, 30 Proc. Des. 2002 7th Int. Des. Conf. Dubrov., 2002
- [9] Gausemeier, J.; Möhringer, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 1. Aufl. Paderborn: Heinz Nixdorf Inst., 2005
- [10] Haberfellner, R.: Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung. Zürich: Orell Füssli, 2012
- [11] INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4. Auflage. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015
- [12] Weiliens, T.: Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur, 3. Überarb. u. akt. Aufl. dpunkt-Verlag, 2014
- [13] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung Technischer Produkte. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 2011
- [14] Albers, A.; Scherer, H.; Bursac, N.: Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. In: Procedia CIRP, 2015, S. 129–134
- [15] Seel, N. M.: Psychologie des Lernens: Lehrbuch für Pädagogen und Psychologen. E. Reinhardt, 2003
- [16] Vajna, S.; Bley, H.; Hehenberg, P.; Weber, C.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure Eine praxisbezogene Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [17] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A.: Product Design for Manufacture and Assembly, Third Edition, 3. Aufl. Boca Raton, Fla., London, New York: CRC Press, 2010
- [18] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, 5. Überarb. und erw. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [19] Ropohl, G.: Allgemeine Technologie; eine Systemtheorie der Technik, 3. Überarb. Aufl. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, 2009
- [20] VDA Band 4 Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft, 2. Aufl. Berlin: VDA, 2011
- [21] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2007
- [22] Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.: iPeM – integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. 2016
- [23] Kennedy, M. N.: Product Development for the Lean Enterprise: Why Toyota's System is Four Times More Productive and how You Can Implement it. Oaklea Press, 2008
- [24] Fischermanns, G.: Praxishandbuch Prozessmanagement, 11., grundlegend überarb. Auflage. Wettenberg: Verlag Dr. Götz Schmidt, 2013
- [25] Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 541ff.
- [26] Gebhart, N.; Kruse, M.; Krause, D.: Gleichteile-, Modul- und Plattformstrategie. In Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 111ff.
- [27] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 1973
- [28] Kornwachs, K.: Philosophie für Ingenieure. München: Carl Hanser Verlag, 2015
- [29] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, 1. Auflage. Berlin u.a.: Springer Vieweg, 2014
- [30] Hacker, W.: Denken in der Produktentwicklung: psychologische Unterstützung der frühen Phasen. vdf Hochschulverlag AG, 2002
- [31] Badke-Schaub, P.; Frankenberger, E.: Management kritischer Situationen: Produktentwicklung erfolgreich gestalten, 2004. Aufl. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 2003
- [32] Frankenberger, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H.: Designers: The Key to Successful Product Development. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 2012
- [33] Funke, J.: Problemlösendes Denken. Kohlhammer, 2003.
- [34] Dörner, D.: Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2003
- [35] Kahneman, D.: Schnelles Denken, langsames Denken. München: Siedler Verlag, 2012
- [36] Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften: Systematik, Heuristik, Kreativität. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 1990
- [37] Sell, R.; Schimweg, R.: Probleme lösen: In komplexen Zusammenhängen denken. Berlin, u.a.: Springer-Verlag, 2002
- [38] Albers, A.; Saak, M.; Burkardt, N.: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In: 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 2002
- [39] Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren. Aachen: Shaker Verlag, 1998
- [40] Wynn, D. C.; Eckert, C. M.; Clarkson, P. J.: Modelling Iteration in Engineering Design. In: Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED'07), Bd. 16, Paris, 2007
- [41] Weidenmann, B.: Handbuch Kreativität, 1. Aufl. Weinheim und Basel: Beltz, 2010
- [42] Birkenbihl, V. F.: De Bonos neue Denkschule: Kreativer denken, effektiver arbeiten, mehr erreichen. Landsberg; München: mvg, 2005
- [43] Rustler, F.: Denkwerkzeuge der Kreativität und Innovation, 2. Auflage, Aktualisiert und erweitert. Zürich: Midas Management Verlag AG, 2016
- [44] Tschan, F.: Produktivität in Kleingruppen: Was machen produktive Gruppen anders und besser? Huber, 2000

- [45] *Wöhe, G.; Döring, U.*: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 26. Aufl. München: Vahlen, 2016
- [46] *Cooper, R. G.*: „Stage-gate systems: A new tool for managing new products“, Bus. Horiz., Bd. 33, Nr. 3, S. 44–54, Mai 1990
- [47] *White, S. A.*: BPMN Modeling and Reference Guide: Understanding and Using BPMN. Future Strategies Inc., 2008
- [48] *Pohl, K.*: Requirements Engineering: Grundlagen, Prinzipien, Techniken. dpunkt-Verlag, 2008
- [49] *Rupp, C.*: Requirements-Engineering und -Management: Aus der Praxis von klassisch bis agil, 6. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [50] *Hubka, V.*: Theorie technischer Systeme: Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Springer, 1984
- [51] *Heufler, G.*: Design Basics; Von der Idee zum Produkt, 4. Aufl. Zürich: niggli Verlag, 2012
- [52] *Reese, J.*: Der Ingenieur und seine Designer: Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005
- [53] *Bullinger, H.-J.*: Einführung in das Technologiemanagement: Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. Stuttgart: Teubner, 1994
- [54] *Andreasen, M. M.; Kähler, S.; Lund, T.*: Design for Assembly. Berlin u.a.: Springer-Verlag, 1988
- [55] *Whitney, D. E.*: Mechanical assemblies: Their design, manufacture, and role in product development. New York: Oxford University Press, 2004
- [56] *Engeln, W.*: Methoden der Produktentwicklung, 2. Aufl. Deutscher Industrieverlag, 2011
- [57] *Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Walter, B.; Gladysz, B.*; IPEK Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT): InnoFox – Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP), 2015
- [58] *Förg, A.; Karrer-Müller, E.; Kreimeyer, M.*: Produktarchitektur. In: *Lindemann, U.* (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 99ff.
- [59] *Eigner, M.*: Informationstechnologie für Ingenieure, 2012. Aufl. Springer, 2012
- [60] *Spur, G.; Krause, F.-L.*: Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. München: Hanser-Verlag, 1997
- [61] *E. Beutner*, Virtuelle Produktentwicklung. Würzburg: Vogel, 2010
- [62] *Nonaka, I.; Takeuchi, H.*: Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen, 2. Aufl. Campus Verlag, 2012
- [63] *Steffen, D.*: Design als Produktsprache; Der „Offenbacher Ansatz“ in Theorie und Praxis, 1. Aufl. Frankfurt am Main: form Verlag, 2000
- [64] *Womack, J. P.; Jones, D. T.*: Lean Thinking: Ballast abwerfen, Unternehmensgewinn steigern, 1. Aufl. Frankfurt am Main; New York: Campus Verlag, 2004
- [65] *Gausemeier, J.; Lanza G.; Lindemann, U.*: Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren; Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. München: Carl Hanser Verlag, 2012

Benennungsindex englisch – deutsch / Term index English – German

Anmerkung: Vorzugsbenennungen sind fett gesetzt. / Note: Preferred terms are set in bold.

Englische Benennung / English term	Deutsche Vorzugsbenennung / German preferred term	Englische Benennung / English term	Deutsche Vorzugsbenennung / German preferred term
analysis	Analyse	physical product architecture	physische Produktarchitektur
architecture	Architektur	platform	Plattform
assurance	Absicherung	principle	Prinzip
black box	Black Box	problem	Problem
change management	Änderungsmanagement	procedural model	Vorgehensmodell
characteristic	Merkmal	process management	Prozessmanagement
concurrent engineering	Concurrent Engineering	product	Produkt
configuration management	Konfigurationsmanagement	product creation	Produktentstehung
cost management	Kostenmanagement	product design	Produktentwicklung
cyber-physical systems	cyber-physische Systeme	product documentation	Produktdokumentation
Design for Six Sigma	Design for Six Sigma	product planning	Produktplanung
Design to X/Design for X	Design to X/Design for X	product service system	Produkt-Service-System
effect	Effekt	product value stream	Produktwertstrom
effective principle	Wirkprinzip	property	Eigenschaft
effective structure	Wirkstruktur	property assurance	Absicherung
emergence	Emergenz	quality management	Qualitätsmanagement
evaluation criterion	Bewertungskriterium	requirement	Anforderung
failure mode and effects analysis	Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse	SE	Systems Engineering
FMEA	Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse	series	Baureihe
function	Funktion	simultaneous engineering	Simultaneous Engineering
functional architecture	funktionale Architektur	sociotechnical system	soziotechnisches System
functional specification	Lastenheft	solution principle	Lösungsprinzip
function structure	Funktionsstruktur	specification	Spezifikation
heuristics	Heuristik	stakeholder	Stakeholder
IMS	Innovationsmanagement	synthesis	Synthese
industrial design	Industriedesign	SysML	SysML
innovation management	Innovationsmanagement	systems architecture	Systemarchitektur
iteration	Iteration	systems engineering	Systems Engineering
knowledge management	Wissensmanagement	Systems Modeling Language	SysML
knowledge value stream	Wissenswertstrom	systems theory	Systemtheorie
lean product development	Lean Product Development	systems thinking	Systemdenken
metacognition	Metakognition	task	Aufgabe
method	Methode	technical specification	Pflichtenheft
model	Modell	UML	UML
module	Modul	Unified Modeling Language	UML
modular system	Baukasten	validation	Validierung
morphological box	morphologischer Kasten	variant management	Variantenmanagement
		verification	Verifikation
		white box	White Box