



Martin Eigner
Daniil Roubanov
Radoslav Zafirov *Hrsg.*

Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung

Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung

Martin Eigner • Daniil Roubanov
Radoslav Zafirov
(Hrsg.)

Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung

Herausgeber
Martin Eigner
Daniil Roubanov
Radoslav Zafirov

Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung
Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Kaiserslautern
Deutschland

ISBN 978-3-662-43815-2
DOI 10.1007/978-3-662-43816-9

ISBN 978-3-662-43816-9 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

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

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Kurzbeschreibung vom Buch

Eine innovative interdisziplinäre Produktentwicklung erfordert das Überdenken heutiger Methoden, Prozesse, IT-Lösungen und Organisationsformen. In diesem Buch wird anhand eines zentralen Beispiels das interdisziplinäre Vorgehen zur modellbasierten Entwicklung mechatronischer Systeme am erweiterten V-Modell (dem MVPE-Modell) beschrieben. Dabei werden bestehende disziplinspezifische und disziplinübergreifende Konstruktionsmethoden berücksichtigt. Die durchgängige Nutzung digitaler Modelle wird in den Phasen des Requirements Engineering, der interdisziplinären Systemmodellbildung, der disziplinspezifischen Detailentwicklung sowie der digitalen Fabrikplanung veranschaulicht. Weiterhin werden die Ausgestaltung und Steuerung von Entwicklungsprozessen über Prozessmodelle adressiert. Zentrale Faktoren in der Entwicklung, wie Produktkomplexität, Humanfaktoren und Nachhaltigkeit werden darüber hinaus beleuchtet. Der Nutzen des Modelleinsatzes über den Produktentwicklungsprozess hinaus wird damit herausgestellt.

Wichtige Punkte

- Rechnerunterstützung im Produktentwicklungsprozess
- Nutzung digitaler Modelle statt Dokumente
- Entwicklungsvorgehen, das die Multidisziplinarität berücksichtigt
- Modellbasierte Entwicklung in der frühen Phase: Requirements Engineering, Systempezifikation, Simulation
- Fokus auf jede Disziplin in der Phase der disziplinspezifischen Ausdetaillierung
- Modellbasierte Fabrikplanung mit der Digitalen Fabrik
- Entwicklungs-, Produktionsprozesse und Ressourcen im Griff haben: PLM & ERP
- Faktoren: Humanfaktoren, Nachhaltigkeit, Komplexitätsmanagement
- Zentrales durchgängiges Beispiel: der Segway

Vorwort

Es ist unbestritten, dass die Innovationsfähigkeit deutscher Unternehmen von essentieller Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland ist. Der Erfolg von Innovationen hängt letztlich davon ab, Ideen möglichst effizient und effektiv in technologisch hochwertige Produkte für globale Märkte zu überführen. Vor diesem Hintergrund kommt dem Produktentwicklungsprozess (PEP) eine zentrale Bedeutung zu. Verfolgt man die Produktentwicklung in den letzten 50 Jahren, so haben der Funktions- und damit auch der Komplexitätsumfang dramatisch zugenommen. Dieser Trend wird sich durch das Internet der Dinge bzw. die internetbasierten Dienstleistungen noch weiter verstärken (Industrie 4.0). Die Aussage vieler Ingenieure „*Früher war alles viel einfacher...*“ spiegelt diese Entwicklung nur unzureichend wieder. Heutige Produkte werden für die Produktentwickler zunehmend komplexer und führen oftmals zu einem Gefühl der Überforderung. Virtualisierung, Integration und Interdisziplinarität zwischen den Bereichen der Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software und Dienstleistung sowie die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus werden zur Grundlage eines modernen PEP. Dazu kommen die beiden Gestaltungs-dreiecke des PEP, welche die Spannungsfelder Technik, Organisation und Mensch sowie Ökonomie, Ökologie und Soziologie aufspannen und dem Ingenieur eine größere betriebliche und gesellschaftliche Verantwortung übertragen. Kompetenzen wie zum Beispiel Akzeptanz, Internationalität, Motivation, Organisationsfähigkeit, Prozessverständnis, Verantwortungsgefühl, Kreativität und Kommunikationsfähigkeit gewinnen immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig werden Berufseinsteiger an Universitäten und Hochschulen aufgrund veralteter Ausbildungskonzepte nur unzureichend auf die genannten Anforderungen am späteren Arbeitsplatz vorbereitet.

Die Herausgeber und Autoren möchten für Studierende der Ingenieurwissenschaften und für Ingenieure, die bereits im Berufsleben stehen sowohl einen Überblick über interdisziplinäre Methoden, Prozesse und IT-Lösungen als auch Beispiele des Gestaltungsrahmens geben. Insofern werden auch die Themen technische Organisation und Prozessgestaltung, Human Factors sowie nachhaltige Produktentwicklung behandelt.

Zu dem vorliegenden Buch hat eine Reihe von Experten beigetragen, denen unser Dank gebührt. Herzlich bedanken möchten wir uns bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls

für Virtuelle Produktentwicklung und insbesondere unseren Mitautoren sowie bei unseren studentischen Mitarbeitern Philipp Reise, Philipp Gesner, Werner Ankener und Andreas Wolter für die grafische Gestaltung und Formatierung. Wir möchten uns weiterhin herzlich bei unseren Kollegen an der Technischen Universität Kaiserslautern – Herrn apl. Prof. Dr. Dominik Stoffel aus dem Lehrgebiet Entwurf Informationstechnischer Systeme und Herrn Hermann Meissner aus dem Lehrgebiet für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation – für ihre fachliche Unterstützung und die Durchsicht des Manuskripts bedanken. Dank auch den Konsortialpartnern des BMBF Forschungsprojektes mecPro², für die konstruktiven Diskussionen, die wesentlich zum Inhalt des Buches beigetragen haben.

Kaiserslautern, September 2014

Die Herausgeber
Martin Eigner
Daniil Roubanov
Radoslav Zafirov

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung – Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung	1
	Martin Eigner	
2	Überblick Disziplin-spezifische und -übergreifende Vorgehensmodelle	15
	Martin Eigner	
3	Requirements Engineering und Requirements Management	53
	Torsten Gilz	
4	Modellbildung und Spezifikation	77
	Radoslav Zafirov	
5	Modellbildung und erste Simulation	97
	Torsten Gilz und Radoslav Zafirov	
6	Mechanikkonstruktion (M-CAD)	115
	Daniil Roubanov	
7	Elektrik und Elektronik (E-CAD)	137
	Radoslav Zafirov und Daniil Roubanov	
8	Computer-Aided Software Engineering (CASE)	161
	Alexander Keßler	
9	Produktmodelle und Simulation (CAE)	175
	Daniil Roubanov	
10	Produktionsmodelle und Simulation (DiFa)	197
	Radoslav Zafirov	
11	Technische Organisation des Produktentwicklungsprozesses	227
	Martin Eigner	

12 Product Lifecycle Management (PLM)	267
Martin Eigner	
13 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	301
Marcellus Menges, Daniil Roubanov und Joscha Ernst	
14 Schnittstellen und Datenaustauschformate	327
Sebastian Sindermann	
15 Humanfaktoren in der Produktentwicklung	349
Joscha Ernst	
16 Nachhaltige Produktentwicklung	369
Patrick Schäfer und Hristo Apostolov	
Sachverzeichnis	393

Einleitung – Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung

1

Martin Eigner

Kurzfassung

Eine innovative, interdisziplinäre Produktentwicklung erfordert das Überdenken heutiger Konstruktionsmethoden, Prozesse, IT-Lösungen und Organisationsformen. Elektronik und Software stellen einen immer stärkeren Anteil am Produkt dar. Konstruktions- und Entwurfsmethoden aller Disziplinen – also Maschinenbau, Elektrotechnik/Elektronik und Software – sollten auf den Prüfstand gestellt und ihre Tauglichkeit für einen modernen interdisziplinären Konstruktionsansatz überprüft werden und in einen gemeinsamen integrierten und interdisziplinären Methoden- und Prozessansatz überführt werden. IT-Lösungen sind partiell vorhanden, bedürfen aber noch einer Weiterentwicklung bezüglich Anwendbarkeit und Integration.

Lernziele

In diesem Kapitel wird der Leser in die Notwendigkeit und die Grundelemente der interdisziplinären Zusammenarbeit für die Entwicklung innovativer Produkte und Produktionssysteme eingeführt. Die Rahmenbedingungen und das Spannungsfeld der integrierten Produktentwicklung sollen als Grundlage der weiteren Vertiefung im Rahmen dieses Buches dienen. Die Begriffe Produktentwicklung und Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung werden definiert und erläutert.

M. Eigner (✉)

Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung,
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technische Universität Kaiserslautern,
Gottlieb-Daimler-Straße 44, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
E-Mail: eigner@mv.uni-kl.de

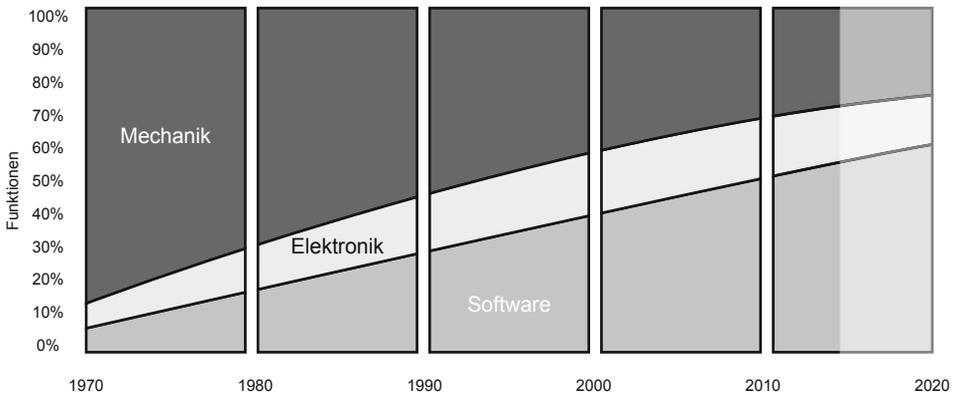


Abb. 1.1 Anteil der Einzeldisziplinen am Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme (nach [11])

1.1 Ausgangssituation

Statistiken der letzten Jahre belegen den permanenten Wandel des Produktentwicklungsprozesses (PEP)¹. Die Einflüsse resultieren aus veränderten Marktbedingungen, aus neuen Anforderungen an das Produkt und aus Kundensicht. Der Anstieg der Produktkomplexität resultiert zum einen aus einer weitaus stärkeren „multi market“ – fähigen Produkt-, Derivaten- und Variantenvielfalt und zum anderen aus der ständigen Zunahme elektronischer Komponenten und der zugehörigen „embedded software“ (☞ Mechatronik). Der wertmäßige Anteil an Elektronik und Software ist in den letzten Jahren ständig gestiegen und liegt z. B. im Fahrzeugbau bei ca. 40 % (Abb. 1.1). Kommunizieren Produkte miteinander, wird von Cyber-Physical Systems bzw. cybertronischen Systemen gesprochen. Aktuelle Forschungsinitiativen (☞ Industrie 4.0/Internet-basierte Dienstleistungen) konzentrieren sich auf technologische Fortschritte mit Software-intensiven eingebetteten Systemen in technischen Produkten [4]. Software wird in Zukunft eine Vielzahl von weiteren Produktfunktionen ermöglichen und damit einerseits die Funktionskomplexität der Produkte erhöhen, andererseits aber auch durch Verschiebung der Varianz von Hardware zu Software die Entwicklungs- und Fertigungskomplexität der Produkte teilweise reduzieren. Dies setzt eine noch stärkere Einbeziehung der Softwareentwicklung in den PEP voraus. Zum Beispiel basieren 50–80 % der Innovationen im Automobilbereich auf Software [12].

Außerdem führt die zunehmende Globalisierung innerhalb der Wertschöpfungskette sowohl innerhalb der OEM's als auch zwischen OEM's und ihren Zulieferern zu komplexeren,

¹ Der hier verwendete Begriff Produktentwicklung bezieht sich sowohl auf die eigentlichen Produkte als auch auf die Produktionsmittel, denn diese sind auch Produkte im eigentlichen Sinne. Diese Begriffsdefinition lehnt sich an die Begriffsbestimmung von Ehrlenspiel an [5]. Damit umfasst der in diesem Buch verwendete Begriff der Produktentwicklung den von vielen Autoren [16, 19] verwendeten Begriff der Produktentstehung.

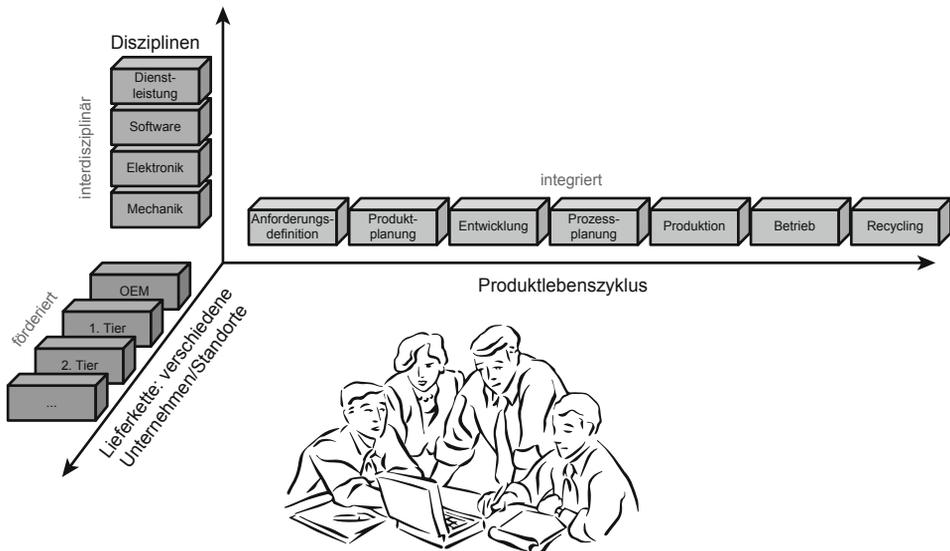


Abb. 1.2 Interdisziplinärer, integrierter Produktlebenszyklus (nach [6])

vernetzten Arbeitsorganisationen und Prozessen. Die Anforderung bereichsübergreifender Kommunikation zwischen allen Beteiligten über verschiedene Kulturräume und Zeitzonen gewinnt immer mehr an Bedeutung.

Daraus leiten sich neue Handlungsbedarfe an Methoden, Prozesse und IT-Lösungen für den interdisziplinären Produktentwicklungsprozess ab. Diese basieren darauf, die Engineering Tätigkeiten über den gesamten *Produktlebenszyklus*, d. h. von der frühen Phase der Anforderungsaufnahme bis hin zum Recycling, über alle *Disziplinen* (↳ Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software und Dienstleistungen) und über die Bereichsgrenzen eines Unternehmens hinaus, organisatorisch und systemtechnisch zu unterstützen (Abb. 1.2).

Es fehlt jedoch an etablierten, d. h. industriell eingesetzten, Methoden, Prozessen und IT-Lösungen für die disziplinübergreifende Entwicklung interdisziplinärer Produkte und Systeme und damit intelligenter und vernetzter Produkte und Produktionssysteme. Dabei hat sich gerade in Europa ab den 70er Jahren in der mechanischen Konstruktion eine auf Funktionen basierende Konstruktionsmethode mit abgeleiteten Entwicklungsprozessen gebildet, die natürlich zu dieser Zeit noch nicht auf formalen Sprachen aufsetzte und schwerpunktmäßig mechanisch geprägt war.

In der Elektrotechnik und Elektronik (E/E) ergibt sich vor allem auf Grund sehr verschiedener Anwendungsgebiete und eines rasanten Technologiewandels insbesondere beim digitalen Schaltungsentwurf ein breiteres Bild der Konstruktionsansätze. Diese reichen von an die Mechanik (VDI 2221) angelehnten Vorgehensweisen [21, 22] für Schaltelektrik bis hin zum Y-Modell von Gajski [8] für den digitalen Schaltungsentwurf.

Im Bereich der Softwareentwicklung wurden auf der Grundlage des Software Engineering detaillierte und umfassende Methoden abgeleitet. Diese zeigen ähnlich der

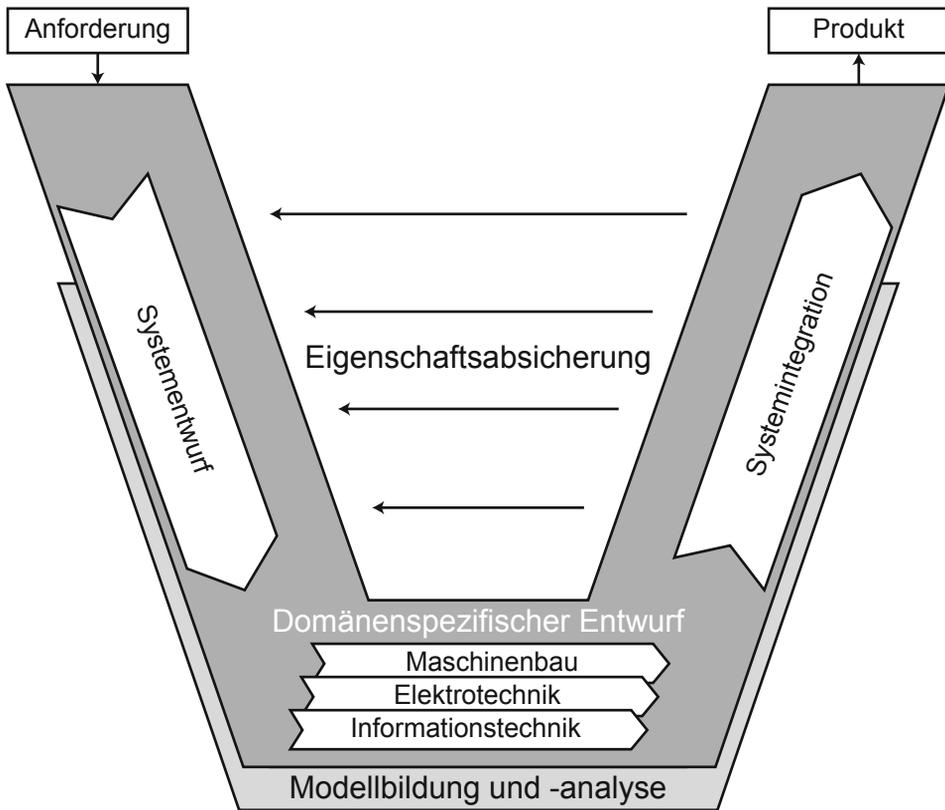


Abb. 1.3 Das V-Modell für Mechatronik Entwicklung (VDI 2206, [23])

Vorgehensweise in der Elektronik häufig andere Muster, z. B. neben der Funktions- eine starke Verhaltensorientierung, als jene, die ihren Ursprung in der Mechanik hatten. Aus der Softwareentwicklung stammen auch die ersten V-Modelle [3].

V-Modelle bildeten auch den Anfangspunkt einer Diskussion über einen Mechatronik-Entwicklungsansatz, der von der VDI-Richtlinie 2206 [23] geprägt wurde (Abb. 1.3). Der Ansatz ist jedoch noch sehr hypothetisch. Die Kommunikation entlang der V-Schenkel sowie zwischen den Disziplinen blieb vage. Ein gemeinsamer Entwurfsansatz auf der konzeptionellen Ebene fehlte.

Parallel wurde seit den 60er Jahren insbesondere bei der amerikanischen Luft- und Raumfahrt und in großen Militärprojekten Systems Engineering (SE) als interdisziplinärer, dokumentengetriebener Ansatz zur Entwicklung und Umsetzung komplexer technischer Systeme in großen Projekten definiert. Dieser Ansatz wurde aus Sicht der Software- und Elektronikindustrie permanent ausgebaut und bietet heute Modellierungs- und Simulationsunterstützung von komplexen, stark vernetzten Systemen an. Systems Engineering basiert auf dem Prinzip, dass ein System mehr ist als die Summe seiner Subsysteme. Aus diesem Grund sollten nicht nur die Zusammenhänge der Teilsysteme, sondern vor allem auch die Gesamtzusammenhänge betrachtet werden.

Nach den Vorgaben der INCOSE² ist das Systems Engineering eine Disziplin, deren Aufgaben die Erstellung und Ausführung eines interdisziplinären Prozesses ist, der garantieren soll, dass Kunden- und Stakeholder-Anforderungen qualitativ hochwertig, zuverlässig, kostengünstig und in vorgegebener Zeit über den gesamten Produktlebenszyklus erfüllt werden können [10]. So schlägt das Vorgehensmodell für komplexe Aufgaben ein Vorgehen vom Groben zum Detail vor, die durch eine Gliederung und Aufteilung von Subsystemen die Komplexität des Gesamtsystems sukzessive reduziert [2, 9]. Aufgabe eines modernen interdisziplinären und integrierten PEP muss die Öffnung und Einbindung aller Disziplinen sowie die Integration eines föderierten, d. h. eines auf verschiedene Standorte und/oder Zulieferer verteilten, Produkt- und Prozessmodells³ sein.

1.2 Produktentwicklung und Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung (MVPE)

Andreasen und Hein [1] verstehen unter integrierter Produktentwicklung den Teil des Unternehmensprozesses, in dem ein Produkt die miteinander verknüpften Stufen vom Konzept bis zum Vertrieb und Inbetriebnahme durchläuft. Zielsetzung dieses Prozesses ist es, ein Produkt intellektuell so zu entwickeln, dass es den in der Eingangsphase festgelegten Anforderungen entspricht und dabei zu günstigen Kosten und in der geforderten Qualität gefertigt, montiert, transportiert, betrieben, gewartet und recycelt werden kann. Viele Autoren definieren vor allem die Herstellbarkeit als permanenten Einfluss, der sich auf alle Phasen des Produktlebenszyklus bezieht. Andreasen und Hein [1] beschreiben die Produktentwicklung als die gleichzeitige Entwicklung von Markt, Produkt und Produktion. Das Ergebnis der Produktentwicklung ist somit eine wesentliche Grundlage des unternehmerischen Erfolges (Abb. 1.4).

Lindemann [13] beschreibt die Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen als unternehmerischen Prozess, der bei den Marktanforderungen startet und mit der Abnahme des Entwicklungsergebnisses durch den Auftraggeber abschließt.

Ehrlenspiel [5] definiert die Integrierte Produktentwicklung aus Prozess- und Organisationssicht als die Integration der Produktentwicklung in den gesamten Prozess der Produkterstellung. Er interpretiert die Integrierte Produktentwicklung als interdisziplinäre Zusammenarbeit aller am Entwicklungsprozess beteiligten Organisationseinheiten.

Meerkamp [14] sieht die Integrierte Produktentwicklung als Spannungsfeld zwischen Kosten, Zeit und Qualität (Abb. 1.5).

Als die vier wesentlichen Merkmale der Integrierten Produktentwicklung beschreibt er:

² International Council on Systems Engineering.

³ Unter Prozessen werden hier die typischen Engineering Prozesse (Freigabe, Änderung, Konfiguration, Datenaustausch entlang der Zuliefererkette, . . .) verstanden.

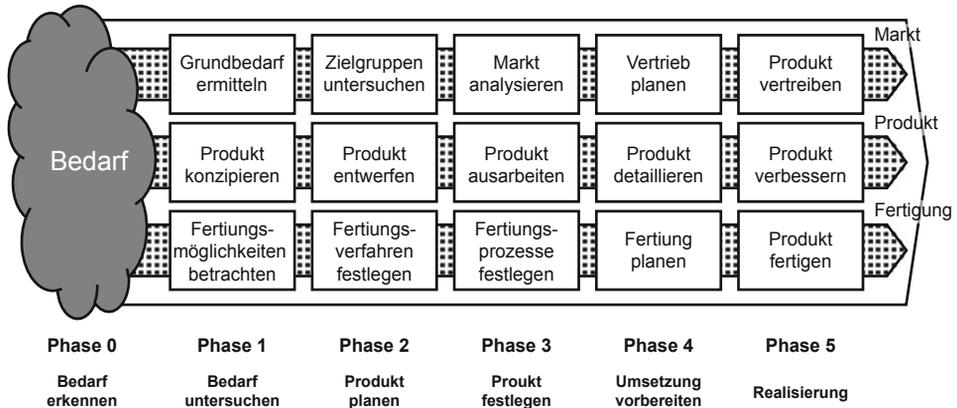
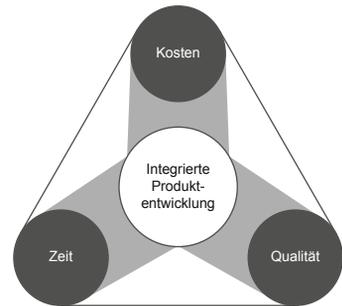


Abb. 1.4 Integrierte Produktentwicklung nach Andreasen und Hein [1]

Abb. 1.5 Integrierte Produktentwicklung im Spannungsfeld von Kosten, Zeit und Qualität (nach [14])



- Ein geändertes Denk- und Arbeitsverhalten, das auf ganzheitliches Denken ausgerichtet ist und partnerschaftliches interdisziplinäres Arbeiten innerhalb des Unternehmens sowie mit Kunden und Zulieferern voraussetzt.
- Eine methodische Vorgehensweise, die eine Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus beinhaltet, bei der nicht nur das Produkt, sondern auch die Prozesse im Vordergrund stehen.
- Eine Organisationsform, die eine teilweise Parallelisierung unterschiedlicher Arbeitsprozesse ermöglicht und interdisziplinäre Teamarbeit fördert.
- Den Einsatz geeigneter informationstechnischer Hilfsmittel, die diesen ganzheitlich integrierten Ansatz unterstützen.

Das Resümee aller Autoren ist der integrative Aspekt der Produktentwicklung in den Produktlebenszyklus. Einige der Autoren beklagen die hohe Verlustleistung durch gewachsene Schnittstellen, d. h. vertikal zwischen den Abteilungen entlang des Produktlebenszyklus und horizontal zwischen den Hierarchieebenen der Aufbauorganisation. Dieses Problem verstärkt sich bei mechatronischen Produkten noch, da die verschiedenen Disziplinen durch mindestens ebenso hohe geistige Mauern getrennt sind wie die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus. Die Unternehmensberatung Arthur D. Little schätzt, dass in der

Praxis bis zu einem Drittel der Selbstkosten eines Unternehmens durch den Aufwand zur Überwindung der Abteilungsschnittstellen anfallen [15].

Definition „Produktentwicklung“:

Die integrierte, multidisziplinäre Produktentwicklung umfasst alle Tätigkeiten und Disziplinen, die das Produkt und sein zur Produktion, Betrieb und Entsorgung benötigtes Umfeld (Werkzeuge, Vorrichtungen, Maschinen, Anlagen, ...) über den Produktlebenszyklus, alle beteiligten Disziplinen und die Zuliefererkette beschreiben. Das Ergebnis ist eine vollständige Produktdefinition („Intellectual Product“), die aus sichten- und phasenorientierten Produktstrukturen und allen zugehörigen Dokumenten und Konfigurationen besteht. Arbeitsprozesse und die Organisationsform müssen einerseits die Kreativität und andererseits die Parallelisierung und Optimierung der nachfolgenden Lebenszyklusphasen unterstützen.

Die *Virtuelle Produktentwicklung (VPE)* unterstützt alle Phasen der Produktentwicklung. Dies umfasst die frühe Phase von der Angebotsbearbeitung, über die Konzeption, die Entwicklung und Konstruktion, die Planung der Fertigungs- und Montageprozesse sowie das gemeinsame und umfassende Management aller auf das Produkt und die Produktionsplanung bezogenen Informationen in digitaler Form und deren Visualisierung. Alle Arbeitsprozesse und IT-Lösungen basieren darauf, die Entwicklungsstufen zu beschreiben, zu dokumentieren, zu optimieren, bzw. simulieren und die Informationen der nächsten Entwicklungsphase zur Verfügung zu stellen. IT als Anwendungswerkzeug bedeutet also, dass der Ingenieur IT-Lösungen zur Erstellung und Dokumentation seiner Arbeitsergebnisse nutzt und im Sinne des gesamten Produktlebenszyklus optimiert. Das bedeutet nicht nur eine Optimierung der aktuellen Entwicklungsphase, sondern auch der nachfolgenden Phasen. Das betrifft z. B. die Fertigungs-, Montage-, Transport-, Wartungs- und Recyclinggerechtigkeit. Diese Philosophie ist bekannt geworden unter dem Namen Design for X (DfX). Modellbasiert wird eine IT-Prozesskette genannt, wenn die Beschreibung in den jeweiligen Lebenszyklusphasen auf einer formalen Sprache⁴, oft unterstützt durch eine leichter erlern- und bedienbare grafische Eingabetechnik, digitale Modelle aufbaut und durch Transformationen der nächsten Phase zur Verfügung stellt. IT-Lösungen zur Beschreibung von Anforderungen, Funktionen, Verhalten und logischen Blöcken, z. B. SysML und ModelicaML, Computer Aided Design (CAD)-Systeme und Product Lifecycle Management (PLM)-Lösungen als Basis der Produkt- und Prozessverwaltung bilden den Kern eines modellbasierten virtuellen Produktentwicklungsprozesses (Abb. 1.6).

Die beiden erstgenannten Systeme beschreiben die funktionale und geometrische Grundlage des Produktes, PLM-Lösungen verwalten und verteilen die digitalen produkt- und prozessrelevanten Informationen. Die damit verknüpften typischen Anwendungen sind:

⁴ Eine **formale Sprache** ist eine abstrakte Sprache, bei der im Unterschied zu konkreten Sprachen nicht die Kommunikation im Vordergrund steht, sondern die mathematisch/physikalische Verwendung. Beispielsweise sind Programmiersprachen formale Sprachen. Eine formale Sprache besteht aus

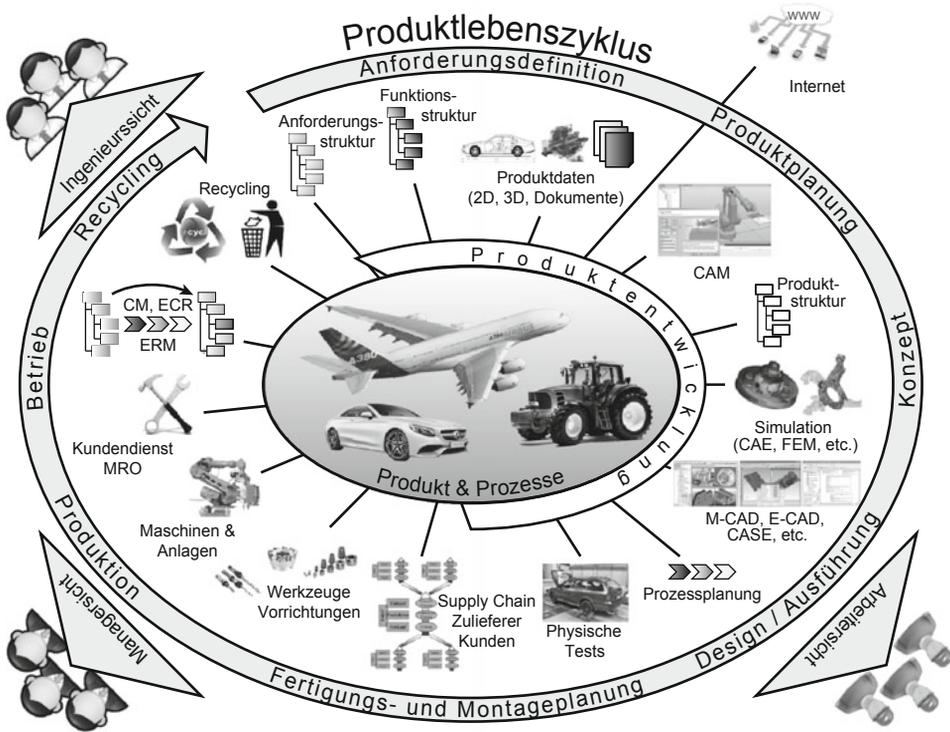


Abb. 1.6 Produktentwicklung als integraler Bestandteil des Produktlebenszyklus und die dazugehörigen IT-Lösungen

- Systemmodellierungssprachen, z. B. SysML und ModelicaML,
- Multiphysikalische Simulationssysteme (Simulink, Matlab, Modelica, VHDL, Verilog, SystemC, ...),
- Computer-Aided Engineering (CAE) zur Berechnung und Simulation
 - Finite Elemente Methode (FEM),
 - Mehrkörpersysteme (MKS),
 - Noise, Vibration and Harshness (NVH),
 - Computational Fluid Dynamics (CFD),
- Computer-Aided Styling (CAS),
- Computer-Aided Manufacturing (CAM),
- Computer-Aided Testing (CAT),
- Digitale Fabrik (DF) und
- Digital Mock-Up (DMU) mit den zugehörigen Visualisierungen

einer bestimmten Menge von Zeichenketten, die aus einem Zeichenvorrat zusammengesetzt werden können (nach Wikipedia).

Die Autorensysteme sind entsprechend dem VDA-Ebenenkonzept (Abb. 12.10) direkt oder indirekt über eine TDM⁵-Lösung mit dem PLM Backbone verbunden.

Definition „Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung“:

Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung (MVPE) ist die durchgehende, rechnerunterstützte, formale Modellbildung und Dokumentation entlang aller entwicklungsrelevanten Phasen des Produktlebenszyklus mit der Zielsetzung der Weitergabe des Modells in die nächste Entwicklungsphase sowie der Weiterverwendung dieser Modelle für Simulation, Validierung und Verifikation. Ziel ist die frühe Erarbeitung des Produkt- und Produktionswissens und damit das frühzeitige Optimieren von Produkteigenschaften im Sinne einer ganzheitlichen Optimierung des gesamten Produktlebenszyklus sowie die drastische Reduzierung von physischen Prototypen.

1.3 Gestaltungsrahmen der Optimierung des PEP

Man erkennt bereits in Abb. 1.1 das Spannungsfeld, in welchem sich ein Ingenieur bewegt, in dem er über Organisationseinheiten, Wissensgebiete und Kultur- und Zeiträume hinweg in einem weltweiten Netz von Zulieferern kommuniziert und interagiert. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen hat sich das Berufsbild des Ingenieurs verändert: Lag früher der Fokus auf fachlichem Wissen, sind heute zunehmend fachübergreifendes Wissen und soziale sowie kommunikative Kompetenzen erforderlich [17]. Ein moderner Produktentwicklungsprozess verlangt von einem Ingenieur unter anderem:

- Die Bereitschaft, das Produkt nicht nur auf Grund seiner Funktionserfüllung, sondern auch für alle der eigentlichen Produktentwicklung nachfolgenden Phasen des Produktlebenszyklus zu optimieren (↳Design for X). Ein Produkt muss nachhaltig sowie fertigungs-, montage-, wartungs-, transport- und recyclinggerecht ausgelegt werden.
- Die Bereitschaft zur interdisziplinären Zusammenarbeit ergibt sich bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung. Hier bedarf es funktionaler Produktspezifikationen und -beschreibungen, die verschiedene Disziplinen übergreifen und berücksichtigen. Interdisziplinär wird hier nicht nur zwischen den verschiedenen Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software verstanden, sondern auch über die verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus, zum Beispiel Produktentwicklung und Produktionsplanung.
- Die Bereitschaft zur internationalen Zusammenarbeit im Rahmen der verteilten Produktentwicklung und Produktion sowie unter den Randbedingungen weltweiter Einkaufs- und Verkaufsmärkte.

⁵ TDM = Team Data Management (ein Verwaltungssystem, das die Daten eines Autorensystems verwaltet, die nicht für den PLM Backbone relevant sind).

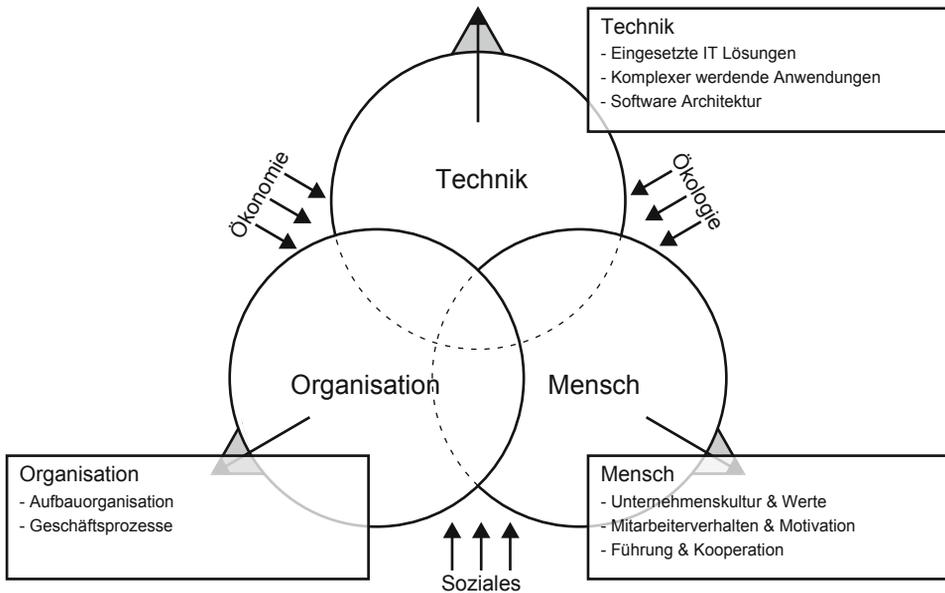


Abb. 1.7 Randbedingungen bei der Optimierung des PEP („Mensch, Technik, Organisation“-Ansatz nach [20])

- Die Bereitschaft bei zunehmender Interdisziplinarität und Integration des Produktentwicklungsprozesses neue Methoden, Prozesse und IT-Tools sinnvoll einzusetzen.

Betrachtet man die aus den Anforderungen an einen innovativen PEP resultierenden Änderungsprozesse im industriellen Bereich und die damit verbundenen Akzeptanzprobleme, so spielen sich diese immer im Spannungsfeld organisatorischer, technischer und personeller Rahmenbedingungen ab (Abb. 1.7).

Interessant ist, dass die Beziehung und Korrelation zwischen Technik, Organisation und Mensch bereits im Rahmen des Computer Integrated Manufacturing (CIM) in den 1980er Jahren diskutiert wurde und als Voraussetzung für die betriebliche Umsetzung der CIM Idee gesehen wurde [18]. CIM gilt allgemein als der Vorläufer der heutigen Industrie 4.0 Philosophie [25]. Während technische und organisatorische Aspekte in der Regel für den Ingenieur vergleichsweise einfach formalisier- und damit gestaltbar sind, ist dies im Bereich der personellen und organisatorischen Rahmenbedingungen weitaus schwieriger [17]. Hier spielen zum einen kognitive und organisatorische Prozesse eine zentrale Rolle, die inter- und intrapersonal verlaufen und damit schwer erfassbar, formalisierbar und, in Bezug auf ihren Beitrag zum Innovationserfolg, bewertbar sind. In Folge dieses Sachverhalts wird in der Praxis die Bedeutung der technischen Organisation (Kap. 11) und Humanfaktoren (Kap. 15) häufig unterschätzt und bei der Gestaltung von Innovationsprozessen vernachlässigt. Weiterhin sind aufgrund des technologischen Fortschritts sowie der Fokussierung auf die Technik die dort vorhandenen Optimierungspotenziale gegenüber Human-

und Organisationsfaktoren in vergleichsweise großem Umfang ausgeschöpft. Akzeptanz, Internationalität, Motivation, Organisationsfähigkeit, Prozessverständnis, Kreativität und Kommunikationsfähigkeit gewinnen als Ingenieur-Kompetenzen immer mehr an Bedeutung. Gerade im Hinblick auf die bereits diskutierte ganzheitliche Betrachtungsweise von Mensch, Technik und Organisation in Bezug auf den Produktlebenszyklus soll verdeutlicht werden, dass nur ein gutes Zusammenspiel dieser drei Bereiche zu einer effektiven und effizienten Zielerreichung führt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Produktlebenszyklus als Kernprozess eines Industrieunternehmens nie losgelöst von der Vision, der Strategie und den Zielen eines Unternehmens gesehen werden sollte und vielmehr ein regelmäßiger Abgleich zwischen allen diesen Bereichen stattfinden sollte.

Eine Erweiterung des Gestaltungsrahmens ist das überlagerte Nachhaltigkeitsdreieck, das aus den Komponenten Ökologie, Soziologie und Ökonomie besteht. Eine produktbezogene Nachhaltigkeitsbetrachtung fokussiert gegenwärtig auf Umweltaspekte, wie Ressourcenverbrauch, Emissionen oder Fragen der Abfallentsorgung [7]. Zwar wird der Begriff Nachhaltigkeit, im englischen Sustainability, in der Literatur durchaus kontrovers diskutiert, dennoch besteht Einigkeit darüber, dass Nachhaltigkeit kein ausschließlich ökologisches Konzept ist, sondern untrennbar mit ökonomischen und sozialen Aspekten verknüpft ist. Im Diskurs zur Nachhaltigen Entwicklung bzw. einem Nachhaltigen Wirtschaften werden die Potenziale der Produktentwicklung bislang nur unzureichend behandelt. Eine nachhaltige Produktentwicklung zielt auf das Gut selbst, aber auch auf die Bewertung des zu seiner Wertschöpfung beitragenden Umfeldes, über den gesamten Produktlebensweg, ab [7, 24]. Dieses Thema wird ausführlich in Kap. 16 behandelt.

Ein typisches Beispiel der sozialen Komponente der Nachhaltigkeit ist die aktuelle Diskussion über Conflict Minerals. Das 1994 eingerichtete *Bonn International Center for Conversion (BICC)* definiert Konfliktrohstoffe wie folgt:

Definition „Konfliktrohstoffe“ (Conflict Minerals):

Konfliktressourcen sind natürliche Ressourcen, deren systematische Ausbeutung und Handel im Kontext eines Konfliktes zu schwersten Menschenrechtsverletzungen, Verletzungen des humanitären Völkerrechts oder Verwirklichung völkerstrafrechtlicher Tatbestände führen kann.

Die zurzeit betroffenen Rohstoffe sind Cassiterite (Tin), Wolframite (Tungsten), Coltan (Tantalite), und Gold. Diese Erze sind essentiell für die Fertigung von Elektrogeräten, insbesondere Computern und Mobiltelefonen [26].

Übungsaufgaben

- Was sind die Grundelemente eines interdisziplinären integrierten Produktentwicklungsprozesses?
- Beschreiben Sie das Spannungsfeld eines integrierten Produktentwicklungsprozesses?
- Beschreiben Sie die integrierte Produktentwicklung nach Andreasen und Hein.
- Welches sind die wesentlichen Merkmale der integrierten Produktentwicklung nach Meerkamp?
- Definieren Sie den Begriff Produktentwicklung.
- Definieren Sie den Begriff Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung.
- Welche IT-Lösungen stehen für den Produktentwicklungsprozess zur Verfügung?
- Welche Komponenten gehören zum Gestaltungsrahmen des PEP?
- Was sind Konfliktrohstoffe?

Literatur

1. Andreasen, M.M., Hein, L.: Integrated Product Development. IFS (Publications), Bedford (1987)
2. Bertram, S.: Entwicklung eines produktlebenszyklusbegleitenden Wissensmanagementsystems in Microsoft® Windows® SharePoint® für ein nachhaltiges robustes Design mechatronischer Systeme. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2008)
3. Bradley, D.A.: Mechatronics and the Design of Intelligent Machines and Systems. Stanley Thorne, Cheltenham (2000)
4. Broy, M.: Cyberphysical Systems: Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Springer, Heidelberg (2010)
5. Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser, München (2003)
6. Eigner, M., Stelzer, R.: Product Lifecycle Management. Springer, Heidelberg (2009)
7. Finkbeiner, M.: Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten und Prozessen – Vom Leitbild zur Umsetzung. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium (PTK 2007), Berlin (2007)
8. Gajski, D.D.: Construction of a large scale multiprocessor. Report/Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, no. UIUCDCS-R-83-1123. Cedar Project, Laboratory for Advanced Supercomputers, Dept. of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill (1983)
9. Habermellner, R., Daenzer, W.F.: Systems Engineering: Methodik und Praxis. Verl. Industrielle Organisation, Zürich (1999)
10. INCOSE: A Consensus of the INCOSE Fellows. <http://www.incose.org/practice/fellowsconsensus.aspx>. Zugegriffen: 19. März 2013
11. ITQ GmbH: Kompetenz in Mechatronik, ITQ, 2014. http://www.itq.de/files/itq_unternehmensbrosch_re_online.pdf. Zugegriffen: 8. Feb. 2014

12. Krause, L.: Strategische Bedeutung des Digital Engineering am Beispiel der Automobilindustrie. Vortrag Universität Bochum, Bochum (2004)
13. Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer, Heidelberg (2005)
14. Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung im Spannungsfeld von Kosten-, Zeit- und Qualitätsmanagement. In: VDI-Bericht 1136 (Hrsg.) Entwicklung- Konstruktion- Vertrieb. VDI-Verlag, Düsseldorf (1994)
15. Nißl, A.M.: Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess, Dissertation am Lehrstuhl Technische Produktentwicklung, Technische Universität München, München (2006)
16. Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung. Springer, Heidelberg (1997)
17. Schleidt, B.: Kompetenzen für Ingenieure in der unternehmensübergreifenden virtuellen Produktentwicklung. Dissertation Technische Universität, Lehrstuhl VPE, Kaiserslautern (2009)
18. Sokianos, N.: Organisations- und Personalentwicklung als strategische Komponente bei der Realisierung von CIM-Konzepten. In: Warnecke, H.-J. (Hrsg.) Produktionsplanung und Produktionssteuerung in der CIM-Realisierung, IPA-Jahrestagung. Springer, Berlin (1986)
19. Spur, G., Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. Hanser, München (1997)
20. Strohm, O., Pardo Escher, O.: Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten. ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation. vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich (1997)
21. VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin (1993)
22. VDI-Richtlinie 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Beuth Verlag, Berlin (1994)
23. VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin (2004)
24. Von Hauff, M.; Kleine, A.: Nachhaltige Entwicklung – Grundlagen und Umsetzung. Oldenbourg, München (2009)
25. Westkämper, E., et al. (Hrsg.): Digitale Produktion. Springer, Heidelberg (2013)
26. Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Konfliktrohstoff>. Zugegriffen: 17. April 2014

Martin Eigner

Kurzfassung

Wissenschaftler aus diversen Disziplinen haben seit vielen Jahren Methoden und Vorgehensmodelle vorgeschlagen, um den Produktentwicklungsprozess (PEP) zu unterstützen. Diese sind in den meisten Fällen als prozessorientierte Richtlinien gedacht: Verschiedene Phasen der PEPs werden als Best Practices definiert, die einmalig oder zyklisch durchlaufen werden sollen. Zusätzlich werden auch die Entwicklungsergebnisse aus jeder Phase in den Vorgehensmodellen vorgeschrieben. Dieses Kapitel verschafft einen Überblick über disziplinspezifische, sowie für die Entwicklung multidisziplinärer Produkte relevante disziplinübergreifende Methoden und Vorgehensmodelle.

Lernziele

In diesem Kapitel soll der Leser tiefer in die Disziplin-spezifischen und die Disziplin-übergreifenden entwurfstechnischen Methoden und Vorgehensmodelle eingeführt werden. Zu den ersten gehören die Methoden und Vorgehensmodelle der Mechanik, der Elektrotechnik und Elektronik sowie der Softwareentwicklung. Zu den zweiten gehören die Methoden und Vorgehensmodelle der Mechatronik und des Systems Engineering. Die Ähnlichkeiten und Unterschiede der verschiedenen Ansätze werden erarbeitet. Der Leser soll die Notwendigkeit interdisziplinärer Methoden und Vorgehensmodelle zur Entwicklung mechatronischer und cybertronischer Produkte verstehen.

M. Eigner (✉)

Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung,
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technische Universität Kaiserslautern,
Gottlieb-Daimler-Straße 44, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
E-Mail: eigner@mv.uni-kl.de

2.1 Vorgehensmodelle der Entwicklung mechanischer Produkte

Nahezu alle für die Mechanik etablierten Vorgehensmodelle (Andreasen [3], Pugh [50], Cross [11], Ehrlenspiel [17], Pahl/Beitz [48], French [22], Eder/Hosnedl [16], Malmqvist [45]) gehen von einem PEP aus, der aus vier Hauptphasen besteht.

- Anforderungs-/Aufgabenklärung, Planen
- Konzipieren
- Entwerfen und
- Ausarbeiten, Detaillieren

Sie definieren in der Konzeptphase einheitlich die Funktion und deren Umsetzung durch Prinziplösung als die wesentliche Elemente dieser Phase. Stellvertretend sei hier die VDI Richtlinie 2221 [57] dargestellt (Abb. 2.1), an der einige Konstruktionswissenschaftler mitgearbeitet haben und die zur damaligen Zeit so etwas wie eine gemeinsame Basis für den PEP für mechanische Produkte zumindest für den deutschen Sprachraum wurde.

Die Anforderungsliste ist das Ergebnis des ersten Arbeitsschrittes *Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung*. Sie ist identisch mit der ersten der vier grundlegenden Konstruktionsphasen *Planen*. Sie bildet gleichzeitig das Dokument zur Produktspezifikation, sowie das Maß für den Grad der Aufgabenerfüllung für die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung. Zusätzlich enthält die Anforderungsliste Hinweise auf wichtige Einflüsse, Absichten oder solche zur Durchführung. Auf dieser Ebene hat sich eine eigene Disziplin gebil-

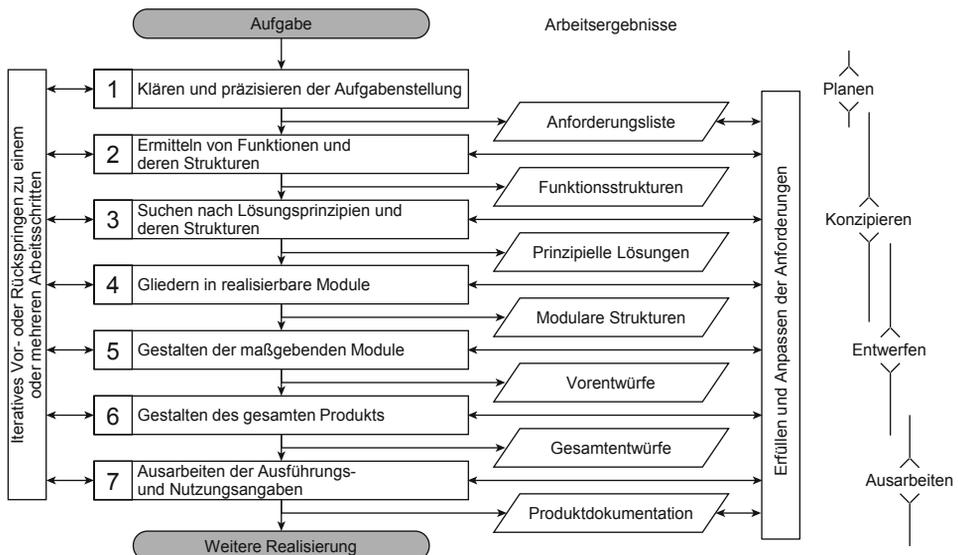
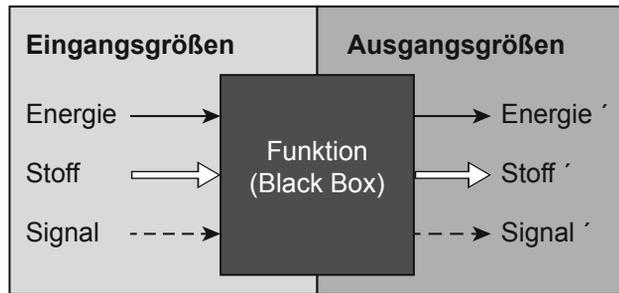


Abb. 2.1 Phasen des PEP nach VDI 2221 [57]

Abb. 2.2 Funktionsdefinition nach Pahl/Beitz [47]



det: Requirements Engineering. Typische Aufgaben des Requirements Engineering sind die Identifizierung von Interessengruppen, Verständnis der Kundenbedürfnisse und der Identifikation, Analyse, Verfolgung und Validierung von Anforderungen.

In der zweiten Konstruktionsphase *Konzipieren* beginnt die Suche nach geeigneten *Funktionsstrukturen* und zugeordneten *prinzipiellen Lösungen*. Diese enthalten für die Funktionserfüllung erforderliche physikalische Effekte sowie die Wirkprinzipien mit geometrischen und stofflichen Merkmalen. Die Lösungsansätze der einzelnen Wirkprinzipien werden als Prinzipskizze dargestellt und bilden zusammengesetzt die Wirkstruktur. Abb. 2.2 zeigt die sehr moderne Definition der Funktion. Neben den Eingangsgroessen Energie und Stoff wird bereits das Signal definiert und damit eine Tür zur Mechatronik geöffnet. In Abb. 2.3 wird die Abbildung von Problemstellung auf Funktion und auf das Wirkprinzip dargestellt.

Die Konzeptphase wird als besonders wichtig anerkannt. Sie eröffnet den größten Spielraum für signifikante Verbesserungen [22]. Entscheidungen, die in dieser Phase getroffen wurden, haben Auswirkungen auf alle nachfolgenden Planungsphasen. Die große Bandbreite der Gestaltungsmöglichkeiten stellt eine Herausforderung für Produktentwickler dar, denn hier müssen Ingenieurwissenschaften, praktisches Wissen, Produktionsverfahren und kommerzielle Aspekte in den PEP eingehen. In dieser Phase wird ein wesentlicher Teil der Gesamtkosten definiert. Das Thema Kostenverursachung versus Kostenverantwortung wird von vielen Autoren angesprochen und ist in der VDI Richtlinie 2235 [56] dargestellt (Abb. 2.4).

In der *Entwurfsphase* werden die prinzipiellen Lösungen zunächst in realisierbare Module gegliedert. Hieraus resultiert eine *modulare Struktur*, welche zusätzlich zur Funktions- und Wirkstruktur, schon eine Gliederung der Lösung des Problems inklusive deren Gruppen, Elementen und Verknüpfungen beinhaltet.

Das Erstellen dieser Strukturen wird nötig, um besonders bei komplexen Konstruktionen, die aufwändigen Gestaltungs- und Konstruktionsarbeiten besser aufteilen zu können und eine effektivere Arbeitsweise zu ermöglichen. So werden auch Konstruktionsschwerpunkte bestimmt; man unterscheidet nach Arbeitsmodulen mit arbeitstechnisch-pragmatischen Schwerpunkten, Montagemodulen zur montagegerechten Produktgestaltung, Wartungsmodulen für einen instandhaltungsfreundlichen Produktaufbau, Recyclingmodulen sowie

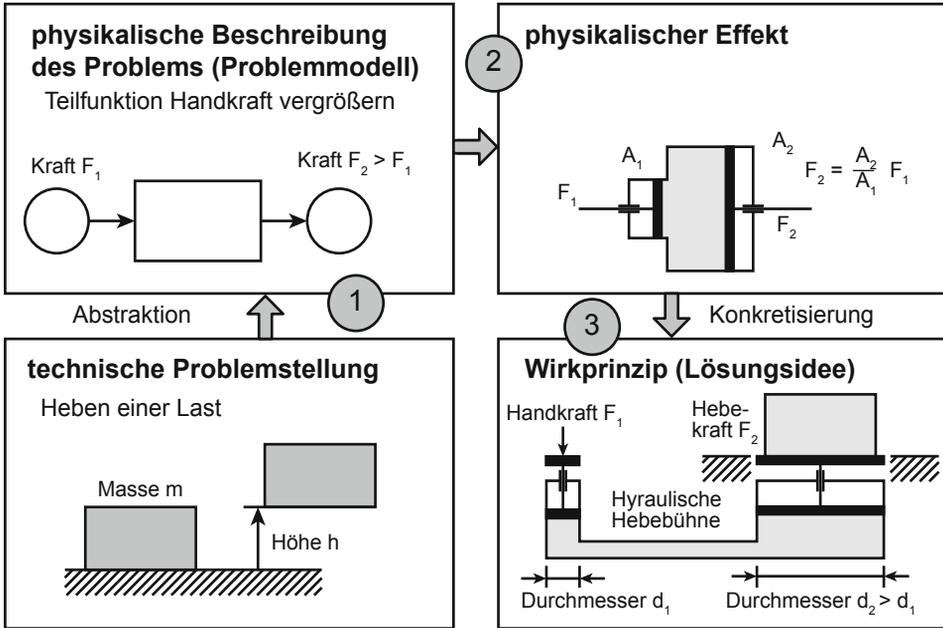
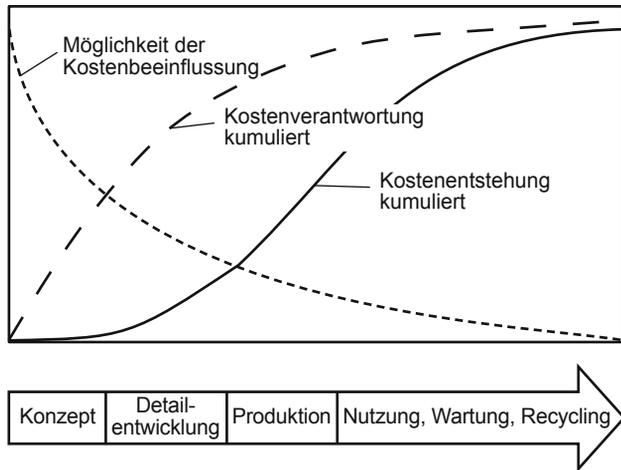


Abb. 2.3 Abbildung Problem – Funktion – physikalischer Effekt – Wirkprinzip (nach [49])

Abb. 2.4 Verhältnis Kostenverantwortung zu Kostenverursachung (in Anlehnung an [7, 18, 21])



Variationsmodule, die eine Baukastenstruktur ermöglichen. So verzweigt sich in diesem Stadium der Produktentwicklung die Konstruktion in eine parallele Bearbeitung von Baugruppen und Einzelteilen. Damit ist die Grundlage für die Erstellung von *Vorentwürfen* gelegt.

Dieser Teil des Konstruierens beinhaltet die gestalterische Festlegung der Lösung [48]. Der Grundstein für diese Phase wurde mit dem Festlegen der Wirkstruktur und der Prinziplösung erarbeitet, sodass im Folgenden die für das Produkt, die Produkt- sowie die Systemoptimierung erforderlichen Module realisiert werden können. Hierzu gehört vor allem die Wahl der Werkstoffe, der Fertigungsverfahren, die Festlegung der Abmessungen, der Untersuchung der räumlichen Verträglichkeit und dem Erarbeiten der Lösungen für die Nebenfunktionen. Hierbei steht immer die technologische und wirtschaftliche Betrachtung der Lösungen im Vordergrund, weshalb der Abschluss dieser Phase auch mit einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung abgeschlossen wird. [48, 57] Der Entwurfsprozess ist gekennzeichnet durch ein iteratives Vorgehen. So wird zunächst die Struktur nur grob erarbeitet, so dass ein Erkennen und Auswählen des Gestaltungsoptimums möglich ist, um letztendlich die Vorentwürfe zu erhalten. [VDI93]. Im nächsten Arbeitsschritt „Gestalten des gesamten Produkts“ wird ein *Gesamtentwurf* erzeugt (Abb. 2.2), der eine Beurteilung der Funktionen, der Haltbarkeit, der Fertigungs- und Montagemöglichkeit, der Gebrauchseigenschaften sowie der Kostendeckung erlaubt.

Nach der Erstellung des Gesamtentwurfs schließt sich das *Ausarbeiten* der Ausführungs- und Nutzungsangaben an. Hierbei werden die Ausführungs- und Nutzungsangaben von den zuständigen Entwicklungs- und Konstruktionsbereichen erarbeitet. In der ersten Phase der Ausarbeitung, dem Detaillieren und Festlegen, werden für das Produkt die endgültigen Vorschriften für Form, Abmessungen, Oberflächenbeschaffenheiten und Werkstoffe festgelegt sowie eine Überprüfung der Herstellungs-, Gebrauchsmöglichkeiten und Kosten durchgeführt, um verbindliche Unterlagen für die stoffliche Verwirklichung und Nutzung zu erhalten. Danach folgt der Schritt des Zusammenfassens. Der Schwerpunkt hierbei liegt in der Erarbeitung von Fertigungsunterlagen, besonders die der Einzelteil- oder Werkstattzeichnungen, Gruppenzeichnungen und, soweit erforderlich, der Gesamtzeichnung und Stückliste. Dieser Teil der Ausarbeitungsphase wird stark von modernen 3D-CAD- sowie PLM-Lösungen unterstützt. Des Weiteren sind bei der Vervollständigung das Erstellen von Montage-, Transport und Prüfvorschriften zur Qualitätssicherung, sowie für den späteren Gebrauch die Betriebs-, Wartungs- und Instandsetzungsanleitungen, zu berücksichtigen. Zusätzlich müssen für die Arbeitsvorbereitung die Unterlagen zur Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung fertiggestellt werden. [48]. Am Ende schließt sich die Prüfung an. Dieser Schritt ist besonders für die Fertigung wichtig und beinhaltet die Kontrolle der Einhaltung von Normen, der fertigungsgerechten Bemaßung, erforderlicher Fertigungsangaben und Beschaffungsgesichtspunkten.

Eine vollständige Übersicht des Produktentwicklungsprozesses ist in Abb. 2.5 dargestellt [21].

Die verschiedenen Ansätze den Konstruktionsprozess zu beschreiben, weisen trotz vieler Gemeinsamkeiten einige Unterschiede auf:

- Ab welcher Phase werden produktionsrelevante Fakten beachtet?
- Ab welcher Phase werden kostenrelevante Fakten berücksichtigt?
- Es wurden neben überwiegend sequentiellen Prozessen mit mehr oder weniger Iterationen, auch zyklische und spiralförmige Prozesse entwickelt.

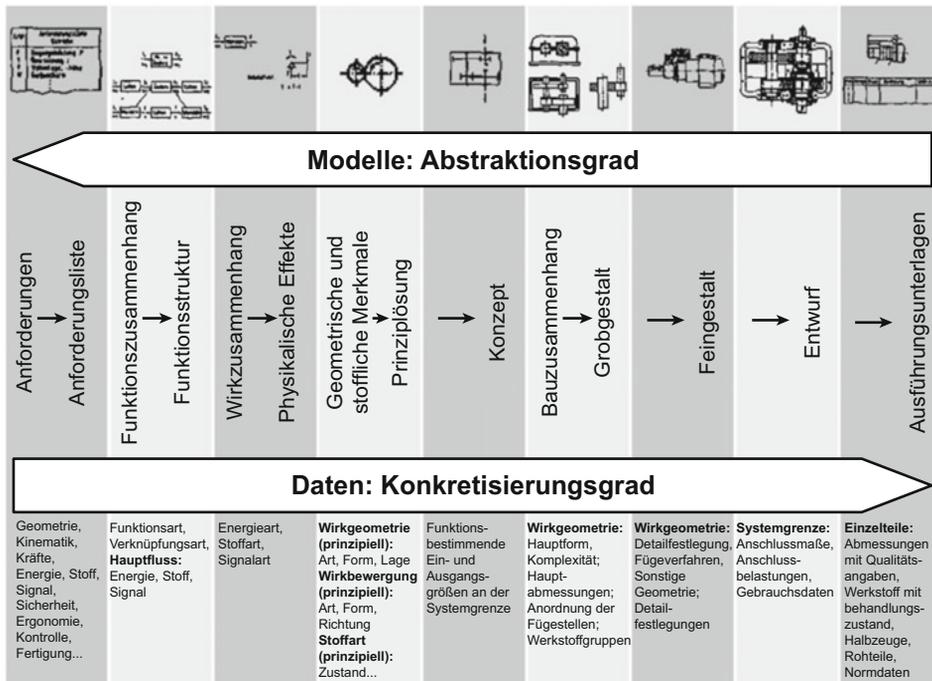


Abb. 2.5 Übersicht über den Produktentwicklungsprozess (nach [21])

Wynn und Clarkson [66] unterscheiden darüber hinaus noch, ob der Ansatz

- Lösungs- oder Problemorientiert,
- Abstrakt, prozedural oder analytisch

ist.

Ein anderer interessanter Aspekt, der gerade im Vergleich zu Konstruktionsmethoden in der Elektronik und der Softwareentwicklung interessant ist, bezieht sich auf die Verwendung des Artefaktes „Verhalten“. Es ist auffallend, dass nur ganz wenige Autoren aus der Sicht der mechanischen Produktentwicklung über Verhalten sprechen. Die Beziehungskette geht i.d. R von Anforderungen zu Funktionen und dann weiter über physikalische Effekte zu Wirkprinzipien.

Andreasen und Hein [4] sprechen von miteinander verbundenen Funktionen, Wirkprinzipien und „Organen“. Mit letzteren meint er die physikalischen Lösungen. Der Begriff Organ wird im übertragenen Sinne verwendet. Interessant ist, dass er die beiden Begriffe zusammenfasst zu Verhalten (engl.: Behavior) (Abb. 2.6). Hier handelt es sich bei der typischen methodischen Vorgehensweise der Mechanik um ein postskriptives Verhalten. Der Mechaniker gibt eine Funktion mit Parametern vor, beschreibt ihre physikalische/geometrische Ausprägung und kann dann über die mathematisch/physikalischen Gesetzmäßigkeiten das Verhalten errechnen, simulieren und/oder physisch testen. Er beschreibt also das Ver-

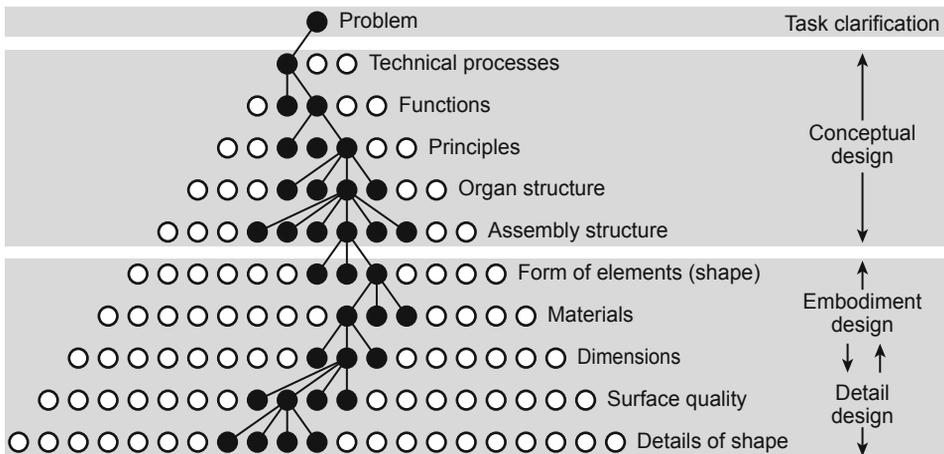


Abb. 2.6 Entwurfsvorgehen von Andreasen & Hein [4], abgebildet auf die vier Standard-Entwicklungsphasen

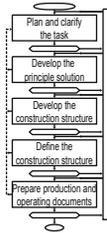
halten nicht, sondern ermittelt es am Entwicklungsergebnis. Der Elektroniker und der Informatiker definieren Verhalten präskriptiv als Teil ihrer Anforderungsspezifikation. Sie beschreiben also das gewünschte Verhalten. Dies ist in diesen Disziplinen einfacher, da es i.d. R durch Logiken und einfache Regeln beschrieben werden kann. Abbildung 2.7 zeigt zusammenfassend einen Überblick der verschiedenen Methoden und Vorgehensmodelle in der mechanischen Produktentwicklung.

2.2 Vorgehensmodelle in der Elektrotechnik und Elektronik

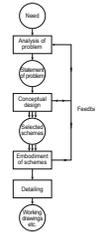
Die Betrachtung der Konstruktionsmethoden in der Elektrotechnik und Elektronik (E/E) ergibt ein breiteres Bild als in der Mechanik. Das mag an vier Dingen liegen:

- Den sehr unterschiedlichen Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik (Abb. 2.8).
- Der grundsätzlich verschiedenen Vorgehensweise des Konstrukteurs in der Elektrotechnik und Elektronik gegenüber der Mechanik, die eine Entwurfsebene des schematischen Entwurfs vor der geometrischen Ausgestaltung (Layout) beinhaltet. Diese schematische Ebene besitzt bereits simulierbare funktional-logische Elemente (Abb. 2.9).
- Dem rasanten Technologiewandel insbesondere beim digitalen Schaltungsentwurf. Komplexität und Integrationsdichte nehmen permanent zu. Dabei steigen die Anforderungen an höhere Packungsdichte, geringere Strukturgröße, Leistungsfähigkeit, geringerer Platzbedarf, hohe Taktrate und geringerer Leistungsverbrauch [39].
- Der Evolution der Automatisierungstechniken bezüglich logischem und physikalischen Entwurf sowie der Verifikation (Abb. 2.10) [61].

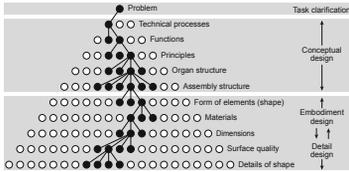
Pahl/Beitz (1996)



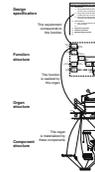
French (1999)



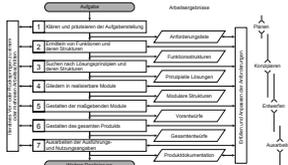
Andreasen & Hein (1987)



Malmqvist (1999)



VDI 2221 (1993)



MKM Ponn & Lindemann (2011)

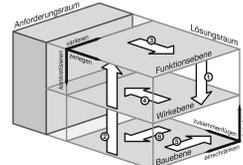


Abb. 2.7 Überblick über Methoden und Vorgehensmodelle der Mechanikkonstruktion

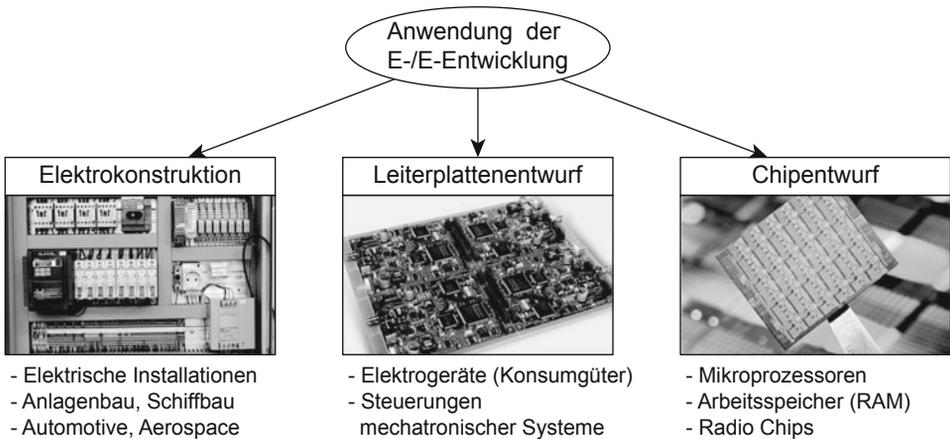


Abb. 2.8 Anwendungsgebiete der Elektrokonstruktion und Elektronikentwicklung

Nach Kümmel [38] und Stephan [54] existieren jedoch in den verschiedenen Anwendungsgebieten unterschiedliche Entwurfsstrategien. So lehnt sich zum Beispiel die VDI/VDE Richtlinie 2422 [58] für den Entwurf von Geräten, die von Mikroelektronik gesteuert werden, stark an die VDI Richtlinie 2221 an. Der Schwerpunkt der Richtlinie liegt in der Beschreibung des konkreten Vorgehens bei der Geräteentwicklung. Dazu werden die Vor-