

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Produktentwicklung

# **Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse**

**David Hellenbrand**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier,  
Universität Paderborn

Die Dissertation wurde am 31.10.2012 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen  
am 28.02.2013 angenommen.

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

ISBN 978-3-8439-1073-6

© Verlag Dr. Hut, München 2013  
Sternstr. 18, 80538 München  
Tel.: 089/66060798  
[www.dr.hut-verlag.de](http://www.dr.hut-verlag.de)

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Autoren und ggf. Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der Vervielfältigung und Verbreitung in besonderen Verfahren wie fotomechanischer Nachdruck, Fotokopie, Mikrokopie, elektronische Datenaufzeichnung einschließlich Speicherung und Übertragung auf weitere Datenträger sowie Übersetzung in andere Sprachen, behält sich der Autor vor.

1. Auflage 2013

# VORWORT DES HERAUSGEBERS

## **Problemstellung**

Die Integration unterschiedlicher technischer Disziplinen in mechatronischen Produkten führt zu gesteigerten und neuartigen Herausforderungen für die Entwicklungsprozesse. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die hohe Komplexität dieser Produkte, da ihre Funktionalität nur durch das wohldefinierte Zusammenwirken der unterschiedlichen disziplinspezifischen Funktionen und Komponenten realisiert werden kann. Die Entwicklung mechatronischer Produkte erfordert somit die zielgerichtete und effektive Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen in allen Phasen der Entwicklung. Dies führt ebenfalls zu einer Steigerung der Komplexität in den Entwicklungsprozessen. Die beteiligten Disziplinen nutzen in der Entwicklung ihre spezifischen Vorgehensmodelle und Methoden zur Konkretisierung der Komponenten. Zur Erreichung einer optimalen disziplinübergreifenden Zusammenarbeit ist die zeitliche und inhaltliche Synchronisation der disziplinspezifischen Prozesse mit Hinblick auf das Gesamtsystem erforderlich. Diese Synchronisation ist häufig nicht hinreichend ausgeprägt, so dass bei der Integration verstärkt Probleme aufgrund unberücksichtigter Abhängigkeiten auftreten. Die Entwickler müssen insgesamt in die Lage versetzt werden, ein ganzheitliches Systemverständnis aufzubauen und Zusammenhänge zwischen den Disziplinen zu erkennen, um diese bei der Durchführung des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen.

## **Zielsetzung**

Die zentrale Zielsetzung der Arbeit ist vor diesem Hintergrund die Unterstützung der disziplinübergreifenden Planung sowie der entwicklungsbegleitenden Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse. Diese Unterstützung soll eine funktionsorientierte Entwicklung unter Berücksichtigung von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten ermöglichen und zu einem erhöhten Systemverständnis beitragen. Hierzu werden die Identifikation, Analyse und transparente Darstellung von disziplinübergreifenden Wirk- und Änderungsabhängigkeiten zwischen dem technischen Produkt und den disziplinspezifischen Entwicklungsprozessen fokussiert.

## **Ergebnisse**

Das wesentliche Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist die Herleitung und Entwicklung einer Methodik zur transdisziplinären Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse. Diese umfasst ein generisches Vorgehensmodell sowie zugehörige Methoden und Werkzeuge zur Modellierung, Planung, Analyse, Steuerung und Visualisierung mechatronischer Entwicklungsprozesse. Hierbei werden disziplinübergreifende Abhängigkeiten in der Produktarchitektur sowie Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Prozessstruktur berücksichtigt. Zur Unterstützung des Anwenders wurde eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells erstellt, die neben den zugehörigen Methoden und Hilfsmitteln ebenfalls eine beispielhafte Anwendung umfasst.

Die Basis der entwickelten Methodik bildet ein integriertes Produkt- und Prozessmodell, in dem die Elemente und Abhängigkeiten des betrachteten Systems auf struktureller Ebene abgebildet werden. Darauf aufbauend werden die funktionsorientierte Planung von disziplinübergreifenden Abstimmungs- und Integrationszeitpunkten sowie die Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen unterstützt. Im Vergleich zu bestehenden Ansätzen werden die Funktionen des Produktes zur Strukturierung des Prozesses verwendet und Abhängigkeiten zwischen Produkt und Prozess während der Prozessdurchführung konsequent berücksichtigt. Gleichzeitig können bestehende disziplinspezifische Prozesse sowie deren Synchronisation beibehalten werden. Eine disziplinunabhängige Visualisierung der Systemstrukturen unterstützt die Kommunikation in der Entwicklung und trägt so zu einem erhöhten Systemverständnis und einer verbesserten Synchronisation der Disziplinen bei.

### **Folgerungen für die industrielle Praxis**

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen die zentrale Bedeutung der disziplinübergreifenden Abstimmung und Kommunikation in mechatronischen Entwicklungsprozessen. Die entwickelten Methoden und Hilfsmittel können von Unternehmen auf unterschiedlichen Ebenen zur Synchronisation der beteiligten Disziplinen und somit zur Vermeidung von aufwändigen und kostenintensiven Iterationen verwendet werden. Durch die disziplinübergreifend verständliche Modellierung und Visualisierung von Wirk- und Änderungsabhängigkeiten wird das Systemverständnis der Beteiligten erheblich verbessert. Zudem können bestehende disziplinspezifische Prozesse mit den eingesetzten Methoden und Werkzeugen weiterverwendet werden, wodurch eine hohe Akzeptanz bei den Anwendern erreicht wird und bereits optimierte Teilprozesse erhalten bleiben.

### **Folgerungen für Forschung und Wissenschaft**

In der vorliegenden Arbeit wird die Planung und Synchronisation transdisziplinärer Entwicklungsprozesse auf Basis einer integrativen Betrachtung von Produkt- und Prozessstrukturen dargestellt. Die Strukturierung des Entwicklungsprozesses basiert auf der Analyse von Produktstrukturen sowie deren Merkmalen und fokussiert die zu realisierenden Produktfunktionen. Im Vergleich zu vorhandenen Ansätzen wird somit die Forderung nach einer konsequenten Funktionsorientierung in der Mechatronik auch in der Prozessplanung beachtet. Die wechselseitigen Wirk- und Änderungsabhängigkeiten zwischen Produkt und Prozess werden zudem über den gesamten Entwicklungsprozess betrachtet. Damit wird berücksichtigt, dass die Literatur zwar eine durchgängige Analyse und Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten gefordert, diese jedoch in bestehenden Ansätzen nicht ausreichend unterstützt werden. In der Evaluation wurde die Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes nachgewiesen, so dass das vielfältig anwendbare integrierte Produkt- und Prozessmodell als Basis für weitere Untersuchungen transdisziplinärer Entwicklungsprozesse verwendet werden kann.

Garching, im Mai 2013

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München

## DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München von März 2007 bis Februar 2012.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Unterstützung, mit der er meine Arbeit begleitete. Die mir gestattete große wissenschaftliche Freiheit in Verbindung mit stets konstruktiver Kritik bildete die Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier vom Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn danke ich für die Übernahme der Zweitberichterstattung sowie für seine Mentorenschaft in der TUM Graduate School. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie der reibungslosen organisatorischen Durchführung danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann vom Lehrstuhl für Regelungstechnik der Technischen Universität München.

Mein aufrichtiger Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Produktentwicklung für die freundschaftliche Atmosphäre sowie die stets gute Zusammenarbeit in Projekten, Forschung und Lehre. Stellvertretend möchte ich meine Bürokollegen Stefanie Zirkler, Sebastian Schenkl, Andreas Kain, Katharina Helten und Bergen Helms nennen. Ich danke allen für die wertvolle und gute Zusammenarbeit sowie die konstruktive Unterstützung in Form von zahlreichen Diskussionen und Feedback. Daneben gilt mein Dank auch den Partnern aus Wissenschaft und Industrie, insbesondere David Wynn und Patrick Kuhl, mit denen ich meine Ideen und Ansätze diskutieren und weiterentwickeln konnte.

Ebenso möchte ich mich bei meinen zahlreichen Diplomanden, Semestranten und studentischen Hilfskräften bedanken, die mich in meiner Arbeit unterstützt haben. Hierbei möchte ich Franciska Völgyi und Jonathan Rohloff besonders hervorheben.

Für die Durchsicht meiner Dissertation sowie die wertvollen konstruktiven Anmerkungen bedanke ich mich sehr herzlich bei Stefanie Zirkler, Wieland Biedermann und Sebastian Schenkl. Bei Clemens Hepperle und Bernd Schröer bedanke ich mich für die zahlreichen Diskussionen in der finalen Fertigstellungsphase.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem Carolin Jourdan für ihre Unterstützung und ihr Verständnis. Sie hat mir stets den Rückhalt sowie die Motivation gegeben, diese Dissertation zu einem positiven Abschluss zu bringen und das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, für die uneingeschränkte Unterstützung und Förderung während meiner gesamten Ausbildung bedanken!

München, im Mai 2013

David Hellenbrand



Die folgenden Veröffentlichungen sind Teil der hier vorgestellten Forschungsarbeit:

- Hellenbrand, D.; Diehl, H.; Zirkler, S. C.; Petermann, M.; Lindemann, U.: BMW Multi-disciplinary Development of Electric Sunroof. In: Eppinger, S. D.; Browning, T. R. (Hrsg.): Design Structure Matrix Methods and Applications. Cambridge, Mass: The MIT Press 2012.
- Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: A Framework for integrated Process Modeling and Planning of mechatronic Products. 18th International Conference on Engineering Design. Copenhagen, Denmark, 15.-18.08.2011, 2011.
- Elezi, F.; Graebisch, M.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Application of Multi-Domain Matrix Waste Reduction Methodology in Mechatronic Product Development. 3rd International Conference on Research into Design 2011. Bangalore, India, 10.-12.01.2011, 2011.
- Lindemann, U.; Biedermann, W.; Hellenbrand, D.: Anwendung von Systems Engineering in der integrierten Produktentwicklung. Newsletter Berliner Kreis - Mitteilungen des Berliner Kreises 2/2010 (2010), S. 9-10.
- Hellenbrand, D.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Integrierte funktionsorientierte Produkt- und Prozessmodellierung mechatronischer Produkte. 7. Paderborner Workshop - Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn, 18.-19.03.2010, 2010.
- Scharfenberger, C.; Daniilidis, C.; Fischer, M.; Hellenbrand, D.; Kuhl, P.; Richter, C.; Sabbah, O.; Stolz, M.; Färber, G.: Multidisziplinäre Entwicklung von neuen Türkonzepten als ein Teil einer ergonomisch optimierten Ein-/Ausstiegsunterstützung. OEM Forum Fahrzeugtüren und -klappen 2009. Sindelfingen, 13.-14.05.2009, 2009.
- Fischer, M.; Braun, S. C.; Hellenbrand, D.; Richter, C.; Sabbah, O.; Scharfenberger, C.; Stolz, M.; Kuhl, P.; Färber, G.: Multidisciplinary development of new door and seat concepts as part of an ergonomic ingress/egress support system. The FISITA World Automotive Congress. München, 14-19.09.2008, 2008.
- Diehl, H.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Transparent 3D Visualization of mechatronic systemstructures. 10th International Design Conference DESIGN 2008. Dubrovnik, 19.-22.05.2008, 2008.
- Braun, S. C.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Kostentransparenz in der Mechatronik - Eine Studie über Komplexitäts- und Kostentreiber mechatronischer Produkte. Aachen: Shaker Online 2007.
- Braun, S. C.; Diehl, H.; Petermann, M.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Function Driven Process Design for the Development of Mechatronic Systems. 9th International DSM Conference. München, 11.-12.11.2007, 2007.





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Thematische Einordnung und Abgrenzung der Arbeit .....	3
1.3 Erfahrungsgrundlage und Forschungsmethodik .....	5
1.4 Aufbau der Arbeit .....	8
<b>2. Grundlagen und Herausforderungen mechatronischer Produktentwicklungsprozesse</b> .....	<b>11</b>
2.1 Grundlagen der Entwicklung mechatronischer Produkte .....	11
2.2 Herausforderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme .....	16
2.3 Folgerungen für die Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse .....	22
<b>3. Stand der Forschung und Technik</b> .....	<b>29</b>
3.1 Entwicklung mechatronischer Produkte .....	29
3.1.1 Grundlagen mechatronischer Produkte .....	30
3.1.2 Aufbau und Struktur mechatronischer Systeme .....	32
3.1.3 Zusammenwirken der Disziplinen in mechatronischen Systemen.....	34
3.1.4 Unterstützung der Produktentwicklung mechatronischer Produkte .....	37
3.1.5 Entwicklungsvorgehen in den beteiligten Disziplinen .....	42
3.2 Grundlagen des Systemdenkens und des Systems Engineering .....	45
3.2.1 Systemdenken in der Produktentwicklung .....	46
3.2.2 Modellierung von Produktstrukturen .....	49
3.2.3 Systems Engineering und Integrierte Produktentwicklung .....	52
3.3 Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung.....	59
3.3.1 Grundlagen des Komplexitätsmanagements .....	59
3.3.2 Modellierung komplexer Systeme auf Basis von Matrizen .....	63
3.3.3 Ansätze zur Analyse und Optimierung komplexer Systeme.....	67
3.4 Prozess- und Projektmanagement in der Produktentwicklung .....	71
3.4.1 Grundlagen des Projektmanagements .....	71

3.4.2	Grundlagen Entwicklungsprozesse und Prozessmanagement .....	75
3.4.3	Modellierung und Analyse von Entwicklungsprozessen .....	83
3.5	Ansätze zur Unterstützung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit in der Mechatronik.....	87
3.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	92
<b>4.</b>	<b>Anforderungen an die transdisziplinäre Unterstützung mechatronischer Entwicklungsprozesse.....</b>	<b>95</b>
4.1	Anforderungen an die Methodik .....	95
4.2	Anforderungen an die Modellierung mechatronischer Produktreifegrade.....	98
4.3	Anforderungen an die Visualisierung des Modells .....	99
<b>5.</b>	<b>Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse .....</b>	<b>101</b>
5.1	Grundlagen und Anwendungsgebiete .....	101
5.2	Rahmenwerk und Systemmodell der funktionsorientierten Prozessplanung und Synchronisation .....	109
5.2.1	Rahmenwerk der Prozessplanung und -synchronisation .....	109
5.2.2	Systemmodell der mechatronischen Produktentwicklung .....	111
5.3	Funktionsorientierte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse .....	114
5.4	Vorgehensmodell der funktionsorientierten Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse .....	117
5.5	Integrierte Produkt- und Entwicklungsprozessmodellierung.....	120
5.5.1	Metamodell der integrierten Produkt- und Prozessmodellierung .....	120
5.5.2	Erstellung des Produktmodells.....	123
5.5.3	Erstellung des Prozessmodells .....	129
5.5.4	Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodell .....	131
5.5.5	Datenakquisition, Modellerstellung und Modellinterpretation.....	133
5.6	Planung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse.....	136
5.6.1	Identifikation von Meilensteinen und Erstellung des Prozessplans.....	138
5.6.2	Plausibilitätskontrolle und entwicklungsbegleitende Anpassung .....	145
5.7	Entwicklungsbegleitende Analyse und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse .....	148
5.7.1	Analyse von Wirk- und Änderungsabhängigkeiten .....	149
5.7.2	Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen .....	153

---

5.8	Prozesssteuerung und -kontrolle .....	156
5.8.1	Betrachtungen zu Reifegraden mechatronischer Produkte.....	157
5.8.2	Modellierung und Bewertung des Entwicklungsfortschrittes .....	161
5.9	Rechnerunterstützung und Visualisierung des integrierten Modells .....	165
5.9.1	Grundlegende Überlegungen zur Rechnerunterstützung.....	165
5.9.2	Visualisierung des integrierten Produkt- und Prozessmodells .....	167
<b>6.</b>	<b>Evaluierung der transdisziplinären Prozessunterstützung mechatronischer Produkte .....</b>	<b>171</b>
6.1	Entwicklung eines Schiebebedachs in der Automobilindustrie .....	171
6.1.1	Erstellung des integrierten Produkt- und Prozessmodells .....	173
6.1.2	Prozessplanung auf Basis der Produktarchitektur .....	175
6.1.3	Ergebnisauszüge der entwicklungsbegleitenden Analyse .....	179
6.2	Expertengespräche im wissenschaftlichen sowie industriellen Umfeld .....	182
6.2.1	Darstellung der geführten Gespräche und Interviews .....	183
6.2.2	Ergebnisse der Expertengespräche und Interviews .....	185
6.3	Beurteilung hinsichtlich der gestellten Anforderungen .....	189
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>193</b>
7.1	Ausgangssituation und Problemstellung.....	193
7.2	Vorgehen und Ergebnisse .....	194
7.3	Ausblick.....	196
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>199</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>227</b>
9.1	Untersuchte Internetauftritte der Unternehmen .....	228
9.2	Berechnungsmöglichkeiten für indirekte Abhängigkeiten .....	229
9.3	Übersicht Strukturmerkmale.....	232
9.4	Vorgehen in der Projektplanung .....	233
9.5	Anforderungen an den Ansatz .....	234
9.6	Vollständiges Vorgehensmodell .....	239
<b>10.</b>	<b>Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung .....</b>	<b>253</b>



# 1. Einleitung

*In modernen Produkten des täglichen Lebens sowie des Maschinenbaus kommen zunehmend mechatronische Systeme und Baugruppen zum Einsatz. Diese können gegenüber rein mechanischen Lösungen durch das Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen einen gesteigerten Funktionsumfang und eine erhöhte Qualität bieten. Weiterhin können während der Nutzung der Produkte Funktionen nachgerüstet und Optimierungen durchgeführt werden, wodurch die Hersteller auf die stetig kürzer werdenden Entwicklungs- und Nutzungszyklen reagieren können. Funktional und qualitativ hochwertige mechatronischer Produkte bieten somit den Unternehmen eine Möglichkeit sich in einem globalisierten Wettbewerbsumfeld zu behaupten.*

*Die Entwicklung zunehmend mechatronisch geprägter Produkte stellt die Unternehmen allerdings vor neue Herausforderungen, die den Einsatz angepasster Prozesse und Methoden erfordern. Die gesteigerte Komplexität mechatronischer Produkte führt zu einer erhöhten Komplexität der mit ihnen verknüpften Entwicklungsprozesse. Es ergeben sich daraus neuartige und wachsende Anforderungen an die Entwicklungsprozesse innerhalb der Unternehmen. Zusätzlich zur Bewältigung der rein technischen Herausforderungen ist eine zielgerichtete und effektive Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Informatik entscheidend. Hierfür ist eine integrative Planung unter Berücksichtigung disziplinspezifischer Vorgehensweisen sowie die prozessbegleitende Abstimmung der unterschiedlichen disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse erforderlich.*

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die wesentlichen Funktionen mechatronischer Produkte sind im Gegensatz zu klassischen maschinenbaulichen Produkten durch das Zusammenwirken von mechanischen, elektrotechnischen und informationstechnischen Teilsystemen geprägt. Die Entwicklung mechatronischer Produkte erfordert somit eine zielgerichtete und effektive Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen im Entwicklungsprozess, da nur auf diese Weise die geforderten Funktionen realisiert und langwierige Iterationsschleifen aufgrund nicht kompatibler Teilsysteme vermieden werden können. Als Folge sehen sich die Entwickler in interdisziplinären Entwicklungsprozessen mit einer Vielzahl von disziplinspezifischen und disziplinübergreifenden Abhängigkeiten konfrontiert, die ihnen zum Teil nicht bekannt sind und erst spät in der Produktkonkretisierung identifiziert werden. Dies betrifft zum einen technische Abhängigkeiten im Produkt (z. B. in Form von Schnittstellen), zum anderen organisatorische Beziehungen wie gemeinsame Meilensteine oder disziplinübergreifende Kommunikation. Eine methodische Unterstützung zur frühzeitigen sowie entwicklungsbegleitenden Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten ist bisher nicht in hinreichendem Maße vorhanden.

Weitere Schwierigkeiten in der interdisziplinären Zusammenarbeit ergeben sich aus unterschiedlichen Vorgehensweisen und Blickwinkeln auf das technische Produkt sowie verschiedenartiger Begriffswelten. In Folge resultieren daraus Probleme bei der Integration und Funktionsabsicherung aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsstände sowie fehlgeschlagener

Kommunikation, die zu langwierigen Iterationen und damit hohen Kosten führen. Es ist somit eine systematische Berücksichtigung der disziplinspezifischen Vorgehensweisen sowie eine disziplinübergreifende Darstellung des technischen Produkts und des verknüpften Entwicklungsprozesses sowie der darin enthaltenen Abhängigkeiten erforderlich.

Die geschilderte Problemstellung wird im Folgenden anhand eines einfachen Praxisbeispiels verdeutlicht. Betrachtet wird die Weiterentwicklung verschiedener Teilsysteme eines elektrisch angetriebenen Go-Karts. Zu Beginn der Überarbeitung stand ein funktionsfähiger Prototyp mit einem rein mechanischen bzw. hydraulischen Bremssystem zur Verfügung. Dieses soll durch ein mechatronisches System ersetzt werden, um zusätzliche Funktionalitäten zur Fahrdynamikregelung (wie ESP) unabhängig von der Betätigung des Bremspedals zu realisieren. Parallel dazu wurde die Überarbeitung der vorhandenen Fahrerschnittstelle (Pedalerieinheit) durchgeführt. Das Gas- und Bremspedal sollten aufgrund ergonomischer Anforderungen mit einer Verstellung in Fahrzeuginnenachse ausgestattet werden. Weitere Anforderungen waren die Beibehaltung verwendeter Sensoren für die Pedalstellungen sowie die Erzeugung eines hydraulischen Bremsdrucks als Rückfallsystem für die mechatronische Bremse. Bei der Entwicklung dieser Systeme ist eine Vielzahl von wechselseitigen Abhängigkeiten zu berücksichtigen, von denen einige beispielhaft in Bild 1-1 dargestellt sind.

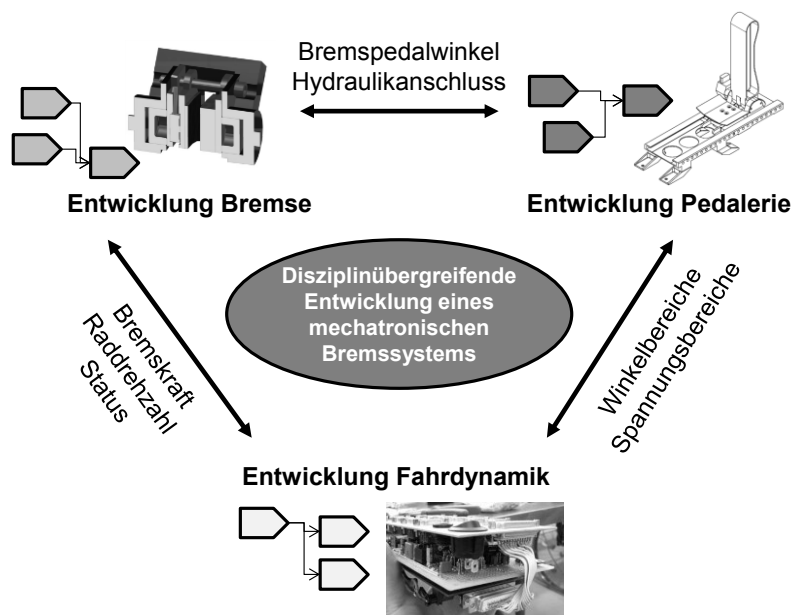


Bild 1-1: Disziplinübergreifende Entwicklung eines mechatronischen Bremssystems

Bei der Entwicklung der drei Teilsysteme sind Abhängigkeiten untereinander zu berücksichtigen. So muss der Entwickler der Pedalerie weiterhin die Erzeugung eines hydraulischen Bremsdruckes realisieren, da dieser als Rückfallebene erhalten bleibt. Neu hinzugekommen ist die elektronische Erfassung und Übermittlung der exakten Bremspedalstellung, da diese Funktion bisher nicht vorgesehen war. Dies muss über einen entsprechenden Sensor mit definierten Spannungs- und Winkelbereichen erfolgen. Darüber hinaus existieren Beziehungen zur Fahrdynamikregelung, welche zur Realisierung von Funktionalitäten wie ABS oder ESP

Informationen über Zustand der Bremse sowie Bremskraft und Raddrehzahlen erfordert. Zusätzlich entstehen Abhängigkeiten zwischen Pedalerie und Fahrdynamikregelung, welche sich nicht direkt aus den geplanten Änderungen ergeben. Durch die geänderte Sensorik der Pedalerie mit geänderten Winkel- und Spannungsbereichen ist eine Anpassung des Fahrdynamikmodells notwendig. Ohne diese würden die Eingangssignale durch das zentrale Steuergerät falsch interpretiert, was zu unvorhersehbaren Fahrzuständen führt. Werden solche Abhängigkeiten erst zu spät im Prozess erkannt, kann dies zu aufwändigen Änderungen und langen Iterationen führen.

Es ist somit die frühzeitige und systematische Identifikation, Erfassung und Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten sowohl innerhalb des Produktes als auch im Prozess notwendig. Diese sollten bereits während der disziplinübergreifenden Planung des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden. Darüber hinaus können sie entwicklungsbegleitend zur Abschätzung von Änderungsauswirkungen, zur Kommunikationsunterstützung und Neuplanung im Fall von Planabweichungen herangezogen werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist somit die methodische Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse unter Berücksichtigung intra- und interdisziplinärer Abhängigkeit sowie heterogener Vorgehensweisen. Dies soll durch die Entwicklung einer geeigneten Produkt- und Prozessmodellierung sowie der Bereitstellung von Vorgehensmodellen und Hilfsmitteln zur Modellerstellung und -interpretation erreicht werden.

## 1.2 Thematische Einordnung und Abgrenzung der Arbeit

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik zur Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse wurde auf die Unterstützung der Serienentwicklung hin entwickelt. Zielsetzung ist, ausgehend von einem vorliegenden Konzept bzw. einer Architektur, eine effektive Zusammenarbeit und Vernetzung der beteiligten Disziplinen in den Phasen des domänenspezifischen Entwurfs sowie bei den Systemintegrations- und Absicherungsaktivitäten sicherzustellen. Hierzu wird ein integriertes Produkt- und Prozessmodell basierend auf Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements zur Analyse der Abhängigkeiten verwendet. Auf dieser Grundlage ergeben sich zwei Hauptanwendungsszenarios (siehe Bild 1-2).

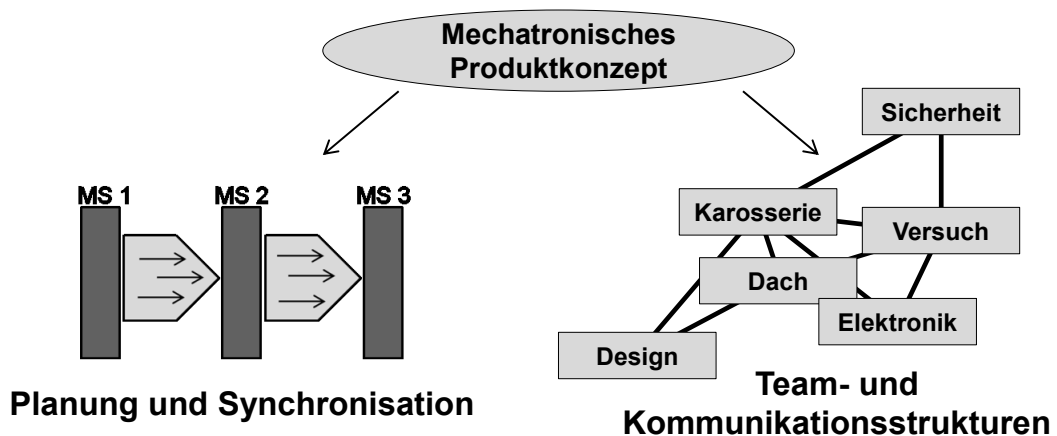


Bild 1-2: Beispielhafte Darstellung der Anwendungsschwerpunkte der entwickelten Methodik

Die Anwendungsschwerpunkte liegen zum einen in der präskriptiven und rollierenden Planung des mechatronischen Entwicklungsprozesses unter Berücksichtigung der disziplinspezifischen Vorgehensweisen sowie ihrer Verknüpfung und Synchronisation über disziplinübergreifende Meilensteine (präskriptiver Charakter). Zum anderen liegen sie in der prozessbegleitenden Visualisierung von domänenübergreifenden Abhängigkeiten zur Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen im Fall von Änderungen oder fehlgeschlagenen Integrations- und Absicherungsaktivitäten (deskriptiver Charakter).

Im wissenschaftlichen Kontext sind für die vorliegende Arbeit vier zentrale Themengebiete relevant (siehe Bild 1-3). Diese überlappen sich in verschiedenen Bereichen und sind nicht als gleichwertige und separat zu betrachtende Forschungsfelder anzusehen. Es sollen stattdessen für diese Arbeit relevante Aspekte unterschiedlicher Forschungsgebiete verdeutlicht werden.

Im Fokus steht das *Prozessmanagement* mechatronischer Produkte, mit den Schwerpunkten der *Planung* sowie der *Synchronisation von Entwicklungsaktivitäten*. Weiterhin sollen die *Kommunikations- und Abstimmungsaktivitäten* im Fall von domänenübergreifenden Änderungsabhängigkeiten unterstützt werden. Hierzu können bestehende Ansätze aus dem Bereich des *Änderungsmanagements* herangezogen werden.

Vor dem Hintergrund der *Entwicklung mechatronischer Produkte* zielt die entwickelte Methodik auf die Unterstützung der *Serienentwicklung* ab. Diese umfasst in erster Linie die Phasen des *domänenspezifischen Entwurfs* sowie der *Systemintegration und -absicherung*. Dabei sind die *disziplinspezifischen Vorgehensmodelle* zu berücksichtigen.

Zur Handhabung der hohen Anzahl verschiedenartiger Abhängigkeiten werden Ansätze des strukturellen *Komplexitätsmanagements* herangezogen. Von Bedeutung sind hier in erster Linie Modelle und Methoden zur *Modellierung, Analyse* und *Visualisierung von Strukturen* und sowie die Identifikation *direkter und indirekter Abhängigkeiten*.

Der interdisziplinäre Charakter mechatronischer Entwicklungen mit unterschiedlichen Blickwinkeln sowie die integrative Betrachtung von Produkt und Prozess erfordern das vernetzte *Denken in Systemen*, welches der Systemtechnik bzw. dem *Systems Engineering* zugeordnet werden kann. Weiterhin sind hier die Betrachtung disziplinübergreifender *Schnittstellen* sowie die Handhabung *domänenübergreifender Abhängigkeiten* zu berücksichtigen.

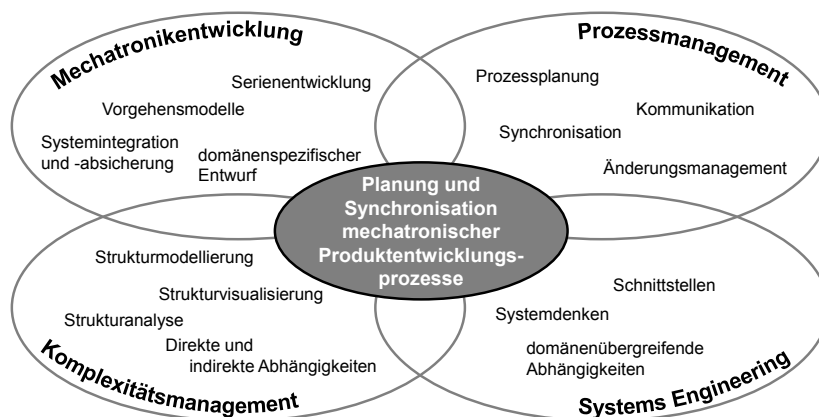


Bild 1-3: Inhaltliche Eingrenzung des Themengebietes der Arbeit



Die vorliegende Arbeit stellt neben den genannten Gebieten ebenfalls einen Beitrag zur Konstruktionswissenschaft bzw. Konstruktionsmethodik dar, weshalb hier eine entsprechende Einordnung vorgenommen wird. Nach [ROOZENBURG & EEKELS 1995, S.30] soll diese dem Entwickler konzeptionelle Hilfsmittel bereitstellen, die ihn bei der effektiven und effizienten Planung, Ausführung und Kontrolle des Konstruktionsprozesses unterstützen. Die entwickelte Methodik zur Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse erfüllt diese Anforderungen. Es bestehen jedoch in Bezug auf die Anwendung bestimmte Einschränkungen. Der Ansatz ist auf die Unterstützung einzelner Serienentwicklungsprozesse fokussiert. Durch die Voraussetzung eines Konzeptes bzw. eine Architektur des zu entwickelnden Produkts findet keine Unterstützung der strategischen Planung sowie der Konzeptfindung statt. Weiterhin wird das Multiprojektmanagement paralleler Entwicklungen nicht betrachtet. Der Ansatz besitzt nur unter den getroffenen Annahmen Gültigkeit und ist somit nach [HUBKA & EDER 1996, S.79] den speziellen Konstruktionswissenschaften zugehörig.

### 1.3 Erfahrungsgrundlage und Forschungsmethodik

Die vorliegende Arbeit entstand während der Tätigkeit des Autors als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München. Die während dieser Zeit bearbeiteten Forschungsprojekte und die darin gesammelten Erfahrungen sowie eine umfassende literaturbasierte Recherche zum Stand der Forschung und Technik bilden die Grundlage der entwickelten Methodik zur funktionsorientierten Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse.

Die zentralen Inhalte der Arbeit wurden im Projekt MechaTUM<sup>1</sup> im Rahmen der CAR@TUM Kooperation zwischen der BMW Group und der Technischen Universität München erarbeitet. An der interdisziplinären Bearbeitung des industrienahen Projektes waren auf Seite der TU München die Lehrstühle für Ergonomie, Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik, Realzeitcomputersysteme sowie Produktentwicklung beteiligt. Das Projekt war in zwei eng miteinander vernetzte Teilbereiche gegliedert. Zum einen wurden innovative Konzepte für das komfortable Einsteigen und das sichere Sitzen von Fahrzeugen entwickelt und zum Ende der Projektlaufzeit prototypisch umgesetzt. Der zweite Teilbereich befasste sich mit der Analyse und methodischen Unterstützung von transdisziplinären Entwicklungsprozessen in der Serienentwicklung. Für die identifizierten Herausforderungen wurden Lösungsansätze entwickelt, die im weiteren Verlauf anhand der Entwicklung des Systems zur Ein- und Ausstiegsunterstützung weiterentwickelt und verbessert wurden.

Wesentliche Grundlagen zu den Herausforderungen mechatronischer Entwicklungsprozesse konnten weiterhin durch die Mitarbeit im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt „Kostenfrüherkennung mechatronischer Projekte durch Analyse multipplanarer Vernetzungen<sup>2</sup>“ gesammelt werden. Im Rahmen einer fragebogenbasierten Studie [BRAUN et al. 2007b] konnten hier Erfahrungen von Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen zur Entwicklung mechatronischer Produkte gewonnen werden.

---

<sup>1</sup> Projektlaufzeit inklusive Vorstudie: Oktober 2005 bis Mai 2009

<sup>2</sup> Projektlaufzeit: Januar 2007 bis Dezember 2010

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt „VireS - Virtuellen Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung<sup>3</sup>“ konnten wesentliche Erkenntnisse zur Modellierung und dem Umgang mit Produktstrukturen sowie einer Vielzahl von interdisziplinären Abhängigkeiten gewonnen werden. Ziel dieses Projektes war die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur frühzeitigen und effektiven Vernetzung von Produktentwicklung und Produktion.

Ein weiteres zentrales Projekts war die Weiterentwicklung und Optimierung verschiedener Teilsysteme eines am Lehrstuhl entwickelten elektrisch angetriebenen Go-Karts (siehe [LAUER 2010]) im Rahmen von studentischen Arbeiten. Im Rahmen dieses Projektes initiierte und betreute der Autor eine Reihe von Studienarbeiten zur Entwicklung mechatronischer Teilsysteme die intensiv beobachtet und analysiert werden konnten (vgl. Tabelle 1-1). Die im Verlauf dieser mechatronischen Entwicklungen gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Weiterentwicklung sowie die Evaluierung der entwickelten Methodik zum Prozessmanagement mechatronischer Entwicklungsprozesse ein.

Zusätzliche Erfahrungen konnten durch die Unterstützung im Teilprojekt B1 „Prozessplanung für die zyklengerechte Leistungsentwicklung“ des Sonderforschungsbereichs (SFB) 768 „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen - Verzahnte Entwicklung von Leistungsbündeln auf Basis technischer Produkte<sup>4</sup>“ gewonnen werden. Hieraus flossen wesentliche Aspekte des Änderungsmanagements, der Iterationsforschung sowie der Kommunikation in transdisziplinären Entwicklungsprozessen ein.

Im Rahmen der Tätigkeit als Koordinator im ebenfalls in der Forschungskoooperation CAR@TUM gemeinsam mit der BMW Group durchgeführten Projektes „Medusa - Minderung von Drehschwingungen im Standardantrieb<sup>5</sup>“ konnten zusätzliche Aspekte des Projektmanagements identifiziert sowie die gewonnen Erkenntnisse zur Arbeit und Kommunikation in interdisziplinären Teams weiter vertieft und evaluiert werden. An der Bearbeitung des Projektes waren die Lehrstühle Angewandte Mechanik, Maschinenelemente, Regelungstechnik sowie Produktentwicklung der TU München beteiligt.

Der Autor war weiterhin intensiv in die Forschergruppen „Systems Engineering“ und „Prozessmanagement“ des Lehrstuhls eingebunden, wodurch eine enge inhaltliche Vernetzung mit Bearbeitern verwandter Themenstellungen erreicht wurde. Im Rahmen dieser Tätigkeiten war der Autor an der Konzeptionierung und Durchführung der ersten und zweiten TUM Spring School on Systems Engineering (TUMS3E) beteiligt. In diesem Rahmen war ein intensiver Austausch mit internationalen Wissenschaftlern zur aktuellen Fragesellungen und relevanten Forschungsfeldern im Bereich des Systems Engineering möglich.

Wie oben beschrieben, sind die Ergebnisse einer Reihe von Studienarbeiten<sup>6</sup> von in die vorliegende Arbeit eingeflossen, die unter wissenschaftlicher und inhaltlicher Anleitung des Au-

---

<sup>3</sup> Projektlaufzeit: Juli 2008 bis Juni 2011

<sup>4</sup> Projektlaufzeit der ersten Förderperiode: Januar 2008 bis Dezember 2011

<sup>5</sup> Projektlaufzeit inklusive Vorstudie: September 2009 bis voraussichtlich Juni 2013

<sup>6</sup> Unter dem Oberbegriff Studienarbeit werden Semesterarbeiten, Diplomarbeiten, Bachelor Thesis sowie Master Thesis zusammengefasst.

tors entstanden sind. Eine Übersicht der betreuten Studienarbeiten sowie der daraus relevanten Aspekte sind in Tabelle 1-1 dargestellt.

Tabelle 1-1: Übersicht der betreuten und für diese Arbeit relevanten Studienarbeiten

Referenz	Autor und Titel der Arbeit	Relevante Aspekte
[Produktentwicklung 2011a]	Matthias Bründl: Entwurf und Konstruktion einer Pedalerieinheit eines elektrisch angetriebenen GoKarts.	- Entwicklungsobjekt Pedalerie Go-Kart
[Produktentwicklung 2011b]	Lukas Fella: Entwurf und Konstruktion eines mechatronischen Bremssystems für ein elektrisch angetriebenes GoKart.	- Entwicklungsobjekt Bremsen Go-Kart
[Produktentwicklung 2011c]	Benjamin Lachner: Entwicklung und Realisierung eines Anzeige- und Bediengerätes sowie Umsetzung des schrittweisen Aufbaus des zentralen Steuergerätes für ein Elektro-Gokart.	- Entwicklungsobjekt Steuergerät Go-Kart
[Produktentwicklung 2011d]	Johannes Thumann: Systematische Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Partitionierungsansätze in der Mechatronik.	- Entwicklungstrends Mechatronik
[Produktentwicklung 2011e]	Franciska Völgy: Entwicklung eines Systems zur Modellierung und Reifegradbestimmung mechatronischer Produkte.	- Systemmodellierung - mechatr. Reifegrade

Die verwendete Forschungsmethodik sowie der daraus abgeleitete Aufbau der Arbeit orientieren sich an der Bearbeitung des Projektes MechaTUM, in welchen die zentralen Inhalte erarbeitet und im Anschluss weiterentwickelt und verfeinert wurde sich. Das zugrundeliegende Vorgehen basiert auf der „Design Research Methodology (DRM)“ [BLESSING & CHAKRABARTI 2009]. Im Vorgehen der DRM erfolgt zunächst eine literaturbasierte Fokussierung des Forschungsgebietes (*Research Clarification*), in der die Forschungsziele sowie ein grundlegendes Verständnis des Untersuchungsgegenstandes abgeleitet wird. Dieses wird darauf aufbauend in einer *ersten deskriptiven Studie* vertieft und erweitert. In der nachfolgenden *präskriptiven Studie* erfolgt die Entwicklung und Synthese des eigenen Lösungsansatzes, welcher abschließend in einer *zweiten deskriptiven Studie* angewandt und evaluiert wird.

Da wesentliche Inhalte in einem industrienahen Forschungsumfeld erarbeitet wurden, wurden die einzelnen Schritte der DRM entsprechend den gegebenen Randbedingungen angepasst. Die Ergebnisse der **ersten deskriptiven Studie** in Form von **Expertengesprächen und Interviews** mit Serienentwicklern in der Automobilindustrie zu den Herausforderungen mechatronischer Entwicklungsprozesse lagen zu Beginn der Arbeit bereits vor und konnten als Grundlage verwendet werden (siehe z. B. [Diehl et al. 2008; DIEHL 2009]). Weiterhin wurden eine **Literaturrecherche** zur Schaffung eines vertieften theoretischen Verständnisses sowie die Auswertung einer **fragebogenbasierten Studie** zur Kostenentstehung in der Mechatronik [BRAUN et al. 2007b] durchgeführt. Die Entwicklung des Lösungsansatzes in **der präskriptiven Studie** erfolgte in erster Linie im Rahmen der Bearbeitung des Projektes MechaTUM, wobei die entwickelte Methodik schrittweise am betrachteten Entwicklungsobjekt sowie an einem abgeschlossenen Entwicklungsprozess getestet und weiterentwickelt wurde. Abschließend wurde der Lösungsansatz in der **zweiten deskriptiven Studie** anhand eines Serienentwicklungsprozesses evaluiert.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Im Folgenden wird der Aufbau der vorliegenden Arbeit dargelegt, um eine Übersicht der einzelnen Teile und deren Zusammenwirken zu vermitteln. Die zugrundeliegende Struktur und die Aufteilung der Kapitel orientieren sich an der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen thematischen Einordnung sowie dem gewählten wissenschaftlichen Vorgehen. Der Aufbau ist in Bild 1-4 grafisch dargestellt.

Nachdem in Kapitel 1 die **zugrundeliegende Problemstellung** anhand eines Beispiels gezeigt sowie die **thematische Eingrenzung** und die **Zielsetzung** dargelegt wurden, erfolgt in Kapitel 2 die detaillierte Darstellung der **Grundlagen und Herausforderungen mechatronischer Produktentwicklungsprozesse** sowie der identifizierten **Handlungsschwerpunkte**. Dazu wird auf Ergebnisse im Rahmen der bearbeiteten Projekte durchgeführten **Interviews und Expertengesprächen** sowie auf die Ergebnisse einer am Lehrstuhl durchgeführten **Fragebogenstudie** zum Kostenmanagement mechatronischer Produkte zurückgegriffen.

In Anschluss an diese grundlegenden Betrachtungen werden in Kapitel 3 die Ergebnisse der **Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung und Technik vorgestellt**. Diese ist entsprechend der relevanten Themenfelder in die Bereiche *Entwicklung mechatronischer Produkte, Systemdenken und Systems Engineering, Komplexitätsmanagement* sowie *Prozess- und Projektmanagement* gegliedert.

In Kapitel 4 werden aufbauend auf den identifizierten Herausforderungen und den Erkenntnissen aus dem Stand der Technik **Anforderungen** an die zu entwickelnde Methodik zur funktionsorientierten Planung und Synchronisation abgeleitet und dargestellt.

Den Hauptteil der Arbeit bildet in Kapitel 5 die Herleitung und Beschreibung der entwickelten **Methodik zur transdisziplinären Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse**. Es werden zunächst die Grundlagen der Methodik sowie das verwendete Systemmodell dargestellt. Im Anschluss erfolgen die Beschreibung des entwickelten Vorgehensmodells zur Modellierung, Planung, Analyse und Steuerung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse sowie die Anwendung der Methodik zur Unterstützung der Planung und Synchronisation. Weiterhin werden die Rechnerunterstützung sowie die grafische Visualisierung des Systemmodells betrachtet.

In Kapitel 6 wird die **Evaluation** der entwickelten Methodik zum Prozessmanagement mechatronischer Produkte anhand eines **Praxisbeispiele** dargestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse von Diskussionen mit Experten aus Forschung und Industrie dargelegt sowie ein Abgleich hinsichtlich der gestellten Anforderungen vorgenommen.

Im abschließenden Kapitel 7 werden das **Vorgehen** und die **zentralen Ergebnisse** der Arbeit zusammengefasst sowie ein **Ausblick** auf weiterführende Forschungsaktivitäten und nicht detailliert behandelte Aspekte gegeben.

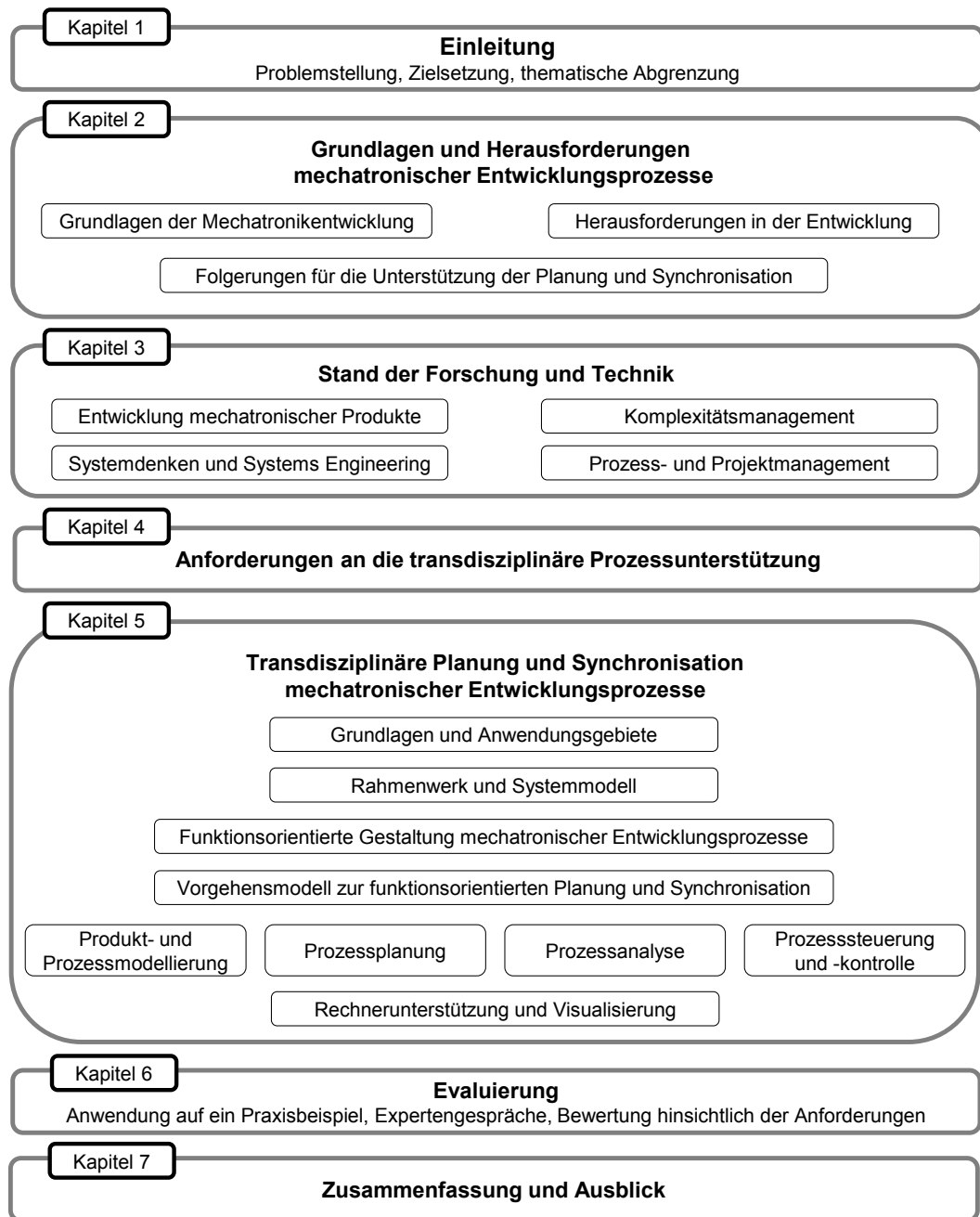


Bild 1-4: Aufbau der Arbeit



## 2. Grundlagen und Herausforderungen mechatronischer Produktentwicklungsprozesse

*In diesem Kapitel werden die Grundlagen sowie Herausforderungen bei der Entwicklung mechatronischer Produkte vorgestellt. Es wird zunächst auf Besonderheiten und Herausforderungen in der Entwicklung eingegangen, die sich aus der hohen technischen Komplexität sowie der Integration unterschiedlicher Disziplinen und deren Zusammenarbeit ergeben. Im Anschluss erfolgen ein Überblick vorhandener Unterstützungsansätze sowie eine vertiefte Darstellung des identifizierten Handlungsbedarfs aus der Literatur sowie der zentralen Ergebnisse aus den deskriptiven Studien. Darauf aufbauend werden Schlussfolgerungen für die Gestaltung einer methodischen Unterstützung zur Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse gezogen.*

### 2.1 Grundlagen der Entwicklung mechatronischer Produkte

In vielen Bereichen industrieller Erzeugnisse finden sich Lösungen, die ihre Funktionalität durch das integrative Zusammenwirken von mechanischen, elektronischen und softwaretechnischen Komponenten erfüllen (siehe Bild 2-1). Diese Produkte werden als **mechatronische Produkte** bzw. **Mechatronik** bezeichnet und ihre Bedeutung nimmt stetig zu.

Die Mechatronik bzw. mechatronische Produkte (vgl. Kap. 3.1) stellen einen wesentlichen Innovationstreiber für die Unternehmen dar, da sich mit ihrer Hilfe Produkte mit neuartigen oder erweiterten Funktionalitäten und Anwendungsgebieten erstellen lassen. In vielen Fällen ermöglicht die Mechatronik erst die Realisierung von Produkten und Funktionalitäten, die mit bisherigen Lösungen durch eine einzige Ingenieurdisziplin nicht möglich sind [BERTSCHE et al. 2009, S.3]. Als Folge dieser Entwicklung hält die Mechatronik seit Jahren einen immer stärkeren Einzug in die Produktentwicklung und ist aus heutigen Unternehmen nicht mehr wegzudenken.

In der Automobilindustrie begann der Durchbruch der Mechatronik Ende der 1970er Jahre mit der Einführung der ersten elektronischen Antiblockiersysteme. Seitdem werden kontinuierlich weitere Teilsysteme durch mechatronische Produkte ersetzt bzw. ergänzt um deren Funktionalität und Leistungsfähigkeit zu verbessern [CZICHOS 2008, BERTSCHE et al. 2009]. Mittlerweise wird eine Vielzahl von Funktionen durch mechatronische Komponenten realisiert bzw. ist auf Mechatronik zurückführbar und „die anfangs nur zusätzlich eingebrachte Elektronik ist inzwischen auf dem Wege, ein vollständig integrierter Bestandteil des ursprünglich rein mechanischen Systems zu werden“ [SCHÖNER 2006, S.9]. Ihre Bedeutung wird dadurch unterstrichen, dass nach verschiedenen Quellen mittlerweile 90% der Innovationen [DAIS 2004; GROMER 2004; CZICHOS 2008] und 30% der Herstellkosten [CZICHOS 2008] in der Automobilindustrie auf Mechatronik zurückzuführen sind.

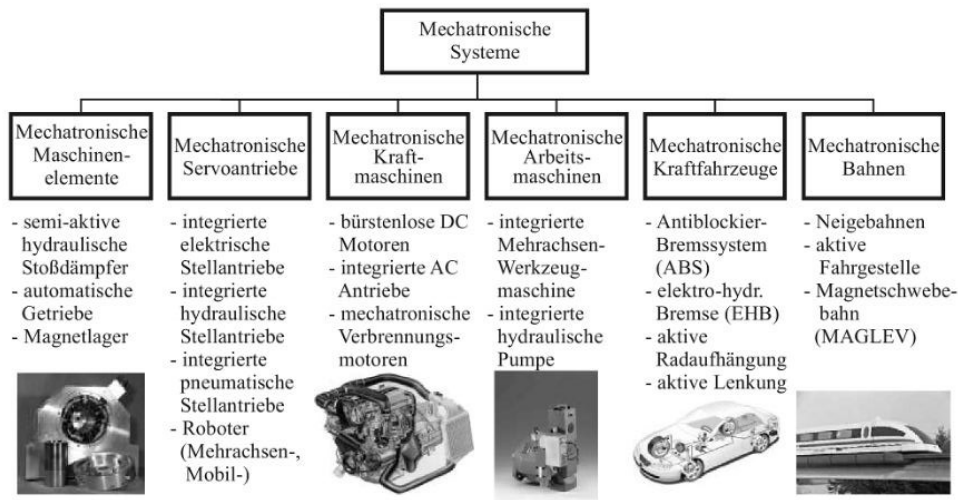


Bild 2-1: Anwendungsbeispiele mechatronischer Produkte [ISERMANN 2007, S.10]

Der anhaltende Trend zum Einsatz mechatronischer Produkte oder Teilsysteme ist auf eine Vielzahl von wirtschaftlichen und technischen Vorteilen zurückzuführen. Als wesentliche Potenziale der Mechatronik werden allgemein sinkende Kosten und Entwicklungszeiten [BERTSCHE et al. 2009], die Realisierung kostengünstigerer, zuverlässigerer und flexibler Produkte [BOLTON 2003] sowie die Verbesserung des Kosten-Nutzenverhältnis [GAUSEMEIER 2010] genannt. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur aufwandsarmen Erweiterung bzw. Veränderung spezifischer Produktfunktionen durch Anpassung der Software nach Beginn der Produktion bzw. während der Nutzungsphase. FELGEN fasst unter Verweis auf [LIPPOLD 2001; MÖHRINGER 2004; VDI 2004] die Potenziale mechatronischer Produkte zusammen [FELGEN 2007, S.44]:

- Reduktion von Bauraum, Gewicht und Energieverbrauch
- Funktions- und Verhaltensverbesserung
- Neue Funktionen und Anwendungen
- Adaptive und lernfähige Systeme
- Reduktion von Kosten, verbessertes Preis-Leistungsverhältnis
- Individuelle Ausrichtung an spezifische Kundenanforderungen

Die Aktualität der genannten Vorteile und damit die Notwendigkeit zur Entwicklung mechatronischer Produkte konnten auch im Rahmen einer durchgeführten **Studie zu Entwicklungsschwerpunkten bzw. -trends in der Industrie** gezeigt werden. Dazu wurden die Internetauftritte von insgesamt 12 produzierenden Industrieunternehmen aus dem Bereich Produktions- und Automatisierungstechnik in Deutschland betrachtet (siehe Anhang 9.1). Diese wurden hinsichtlich der Verwendung von Schlagworten analysiert, die von den Unternehmen zur Beschreibung ihrer Identität sowie ihrer strategischen Ausrichtung genutzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die betrachteten Unternehmen neben hoher Wirtschaftlichkeit und Produktivität ebenso der Steigerung von Energieeffizienz, Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit



sowie umfassenden Lebenszyklusbetrachtungen eine wesentliche Bedeutung beimessen [PRODUKTENTWICKLUNG 2011D, S.11FF].

Den Vorteilen der Mechatronik stehen gestiegene Herausforderungen aufgrund der hohen Komplexität mechatronischer Erzeugnisse gegenüber, die sich aus der hohen Anzahl gekoppelter Elemente (funktional, physikalisch, verhaltensbedingt) ergibt (siehe z. B. [ECKERT & CLARKSON 2005]). So merken BERTSCHE ET AL. an, dass teilweise eine Abnahme der Qualität bzw. Zuverlässigkeit zu beobachten ist, der mit frühzeitigen entwicklungsbegleitenden Einsatz geeigneter Methoden begegnet werden muss [BERTSCHE et al. 2009, GAUSEMEIER 2010].

Eine weitere Zunahme der Komplexität resultiert aus der Integration unterschiedlicher Disziplinen in einen gemeinsamen Entwicklungsprozess, welche eine intensive und domänenübergreifende Zusammenarbeit und Abstimmung über sämtliche Phasen hinweg erfordert. Aufgrund der hohen Anzahl und Vielfältigkeit von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten sowie der übergreifenden Problemstellung ist eine zunehmend transdisziplinäre Bearbeitung der Aufgabenstellung erforderlich, die über eine multidisziplinäre bzw. interdisziplinäre Zusammenarbeit hinausgeht. An dieser Stelle ist eine Abgrenzung<sup>7</sup> der Begriffe notwendig, da diese häufig simultan und nicht klar voneinander getrennt verwendet werden. JAEGER & SCHERINGER bemerken, dass grundsätzlich mit dem Begriff transdisziplinär eine ganzheitliche und fachübergreifende Kooperation assoziiert wird [JAEGER & SCHERINGER 1998].

Die **Multidisziplinarität** stellt die schwächste Form der Zusammenarbeit dar. Sie ist nach BENKE dadurch gekennzeichnet, dass verschiedene Disziplinen vor einem gemeinsamen Hintergrund agieren und an einer gemeinsamen Aufgabe arbeiten wobei nicht zwingend eine Zusammenarbeit stattfinden muss [BENEKE 2004]. Nach JUNGERT findet eine (strukturierte) Zusammenarbeit sowie fachübergreifende Synthesebemühungen nicht statt und jede Disziplin widmet sich nur einem Teilaspekt der bearbeiteten Aufgabe [JUNGERT 2010]. Eine möglicherweise partielle Überlappung der Aufgaben kann dabei vorhanden sein [BRAND 2004, S. 52]. Im Gegensatz dazu erfordert die **Interdisziplinarität** die *gemeinsame Bearbeitung* unterschiedlicher Disziplinen einer Gesamtaufgabe [BENEKE 2004, BRAND 2004, JUNGERT 2010], wobei ein Austausch zwischen den Disziplinen erfolgen kann aber nicht muss [BENEKE 2004]. Als weitere Kennzeichen werden von BENEKE die Zerlegung des Gesamtproblems sowie die fach- bzw. disziplinspezifische Bearbeitung der Teilprobleme genannt. Tendenziell werden die Disziplingrenzen beibehalten, wobei meist ein ansatzweiser Blick darüber hinaus erfolgt [BENEKE 2004]. Bei der **Transdisziplinarität** werden bei der *gemeinsamen Bearbeitung* der Aufgabe die *fachlichen Grenzen verwischt bzw. aufgelöst*, die Aufgabe tritt in den Vordergrund und die Bearbeitung findet nicht innerhalb einer Disziplin statt [BENEKE 2004]. Es finden dabei Transferprozesse in Bezug auf Methoden, Informationsaustausch usw. statt [BENEKE 2004], die verschiedenen Disziplinen treten miteinander in Beziehung und bewegen sich über ihre Grenzen (inhaltlich und methodisch) hinaus auf die anderen Disziplinen zu [BRAND 2004, S.53F]. Die Transdisziplinarität wird auch als eine Form der Zusammenarbeit verstanden, wobei erst durch die neuen Strukturen der Erkenntnisgewinn ermöglicht wird [BENEKE 2004, S.88].

---

<sup>7</sup> Es wird an dieser Stelle eine Abgrenzung im deutschsprachigen Raum vorgenommen. Eine Vergleich sowie eine Definition der Begriffe in englischer Sprache ist bei [CHOI & PAK 2006] zu finden. Die dortigen Schlussfolgerungen decken sich weitgehend mit den hier getroffenen Aussagen.

Der Übergang von der interdisziplinären zur transdisziplinären Projektbearbeitung kann nicht immer klar gezogen werden und in der Praxis liegen häufig Mischformen vor [SUKOPP 2010, S.24]. MITTELSTRAß sieht die Transdisziplinarität vor allem dort wirksam, „wo eine allein fachliche oder disziplinäre Definition von Problemlagen und Problemlösungen nicht möglich ist“ [MITTELSTRAß 2003]. Als Fazit sei festgehalten, dass sich die Transdisziplinarität als die am weitesten fortgeschrittene und entwickelte Form der Zusammenarbeit darstellt und hierbei die Grenzen zwischen den Disziplinen nicht mehr klar gezogen werden können bzw. ganz verschwinden. BRAND merkt weiterhin an, dass sich durch die transdisziplinäre Bearbeitung bestimmter Aufgabenstellungen über den zeitlichen Verlauf neue Disziplinen entwickeln können und gibt als Beispiel die Mechatronik an [BRAND 2004, S.55]. Dies führt jedoch zu erhöhten Anforderungen an die beteiligten Entwickler und die Gestaltung der disziplinübergreifenden Produktentwicklungsprozesse. Eine grafische Übersicht von unterschiedlichen Formen der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit ist in Bild 2-2 dargestellt.

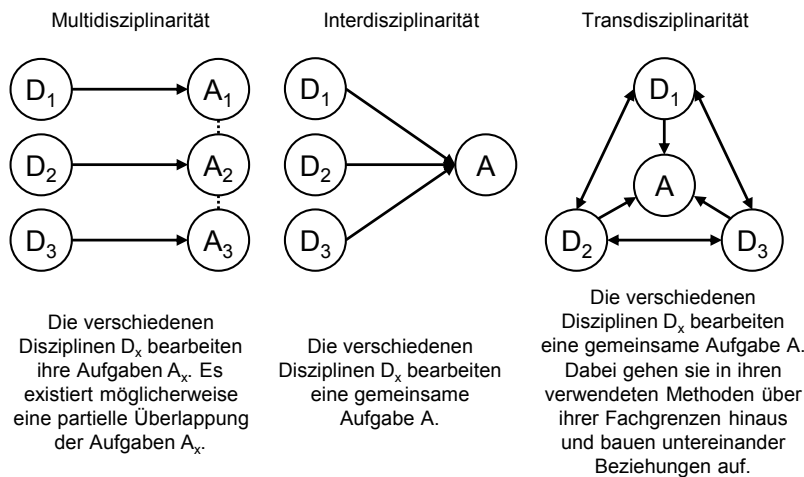


Bild 2-2: Übersicht unterschiedlicher Formen der Zusammenarbeit von Disziplinen [ZIRKLER 2010, S.8]

Für die Entwicklung mechatronischer Produkte bedeutet dies, dass sowohl interdisziplinäre wie auch transdisziplinäre Aspekte eine Rolle spielen. In den frühen Phasen der Problemklärung und des disziplinübergreifenden Systementwurfs (vgl. Kap. 3.1 - Entwicklung mechatronischer Produkte) ist eine transdisziplinäre Bearbeitung erforderlich. In der Phase des domänenspezifischen Entwurfs erfolgt eine eher interdisziplinär geprägte Bearbeitung, da die beteiligten Disziplinen hier tendenziell mit ihren gewohnten Modellen, Begriffen und Methoden arbeiten. In der Phase der Systemintegration hingegen tritt wieder der transdisziplinäre Charakter in den Vordergrund, da an domänenübergreifenden Modellen und Problemen gearbeitet werden muss.

Der Entwurf mechatronischer Produkte erfordert somit mehr als das reine Zusammenfügen mechanischer, elektronischer und softwaretechnischer Komponenten, sondern „dass diese funktionell und technologisch in wohl definierter Weise zusammen wirken müssen“ und alle Elemente der geschlossenen Wirkkette aufeinander abgestimmt sind [JANSCHKE 2010, S.6]. HEIMANN ET AL. merken hierzu an, dass im Vergleich zu konventionellen (maschinenbauli-

chen) Produkten ihre wesentlichen Eigenschaften durch nichtmaterielle Elemente, also Software, bestimmt werden [HEIMANN et al. 2006, S.15]. Sie sind von Beginn an als integriertes Gesamtsystem zu betrachten und es müssen wechselseitig Abhängigkeiten in der Konstruktion berücksichtigt werden [ISERMANN 2007]. Dieses vernetzte Zusammenwirken der unterschiedlichen Disziplinen und Wissensdomänen (Heterogenität) sowie die hohe Anzahl von Funktionen und verkoppelten Elementen führen zu einer hohen Komplexität mechatronischer Produkte, welche eine wesentliche Herausforderung in der Entwicklung darstellt und in allen Phasen berücksichtigt werden muss (vgl. [VDI 2004]). DIEHL merkt an, dass zwischen notwendiger und vermeidbarer Komplexität unterschieden werden muss und fordert unter Bezugnahme auf [MAURER 2007] den Einsatz geeigneter Methoden zur ihrer Beherrschung [DIEHL 2009, S.2]. Die Folgen einer nicht beherrschten Komplexität äußern sich in unter anderem in zeit- und kostenaufwändigen Iterationsschleifen sowie gestiegenen Gewährleistungskosten und unzufriedenen Kunden [GAUSEMEIER et al. 2006, S.18].

Die hohe Produktkomplexität mechatronischer Produkte führt weiterhin zu einer in allen Phasen erhöhten Komplexität in den zu ihrer Erstellung erforderlichen Produktentwicklungsprozessen (vgl. VDI 2004]). Die Erstellungsprozesse erfordern iterative Vorgehensweisen mit wechselnden Detaillierungs- und Konkretisierungsgraden [MÖHRINGER 2004] sowie die effektive domänenübergreifende Kommunikation, Kooperation und Abstimmung der beteiligten Disziplinen zur Erzielung einer ganzheitlichen Lösung [VDI 2004]. Nach JANSCHKE sind daher das Denken und Verstehen in Systemen sowie eine enge Verzahnung von systemtheoretischem Wissen mit physikalisch-technologischem Wissen in unterschiedlichen Domänen erforderlich [JANSCHKE 2010]. ISERMANN betont, dass in mechatronischen Entwicklungsprozessen stets ein „Simultaneous Engineering“ stattfinden muss um Synergieeffekte zu erzielen [ISERMANN 2007, S.5]. In Verbindung mit dem steigenden Zeitdruck und der starken Parallelisierung von Abläufen führt dies zu einer erhöhten Komplexität in den Prozessen, der Organisation sowie den Kommunikationsflüssen (siehe Bild 2-3) [EVERSHEIM & SCHUH 2005, S.22ff; MAIER et al. 2006; WARKENTIN 2010].

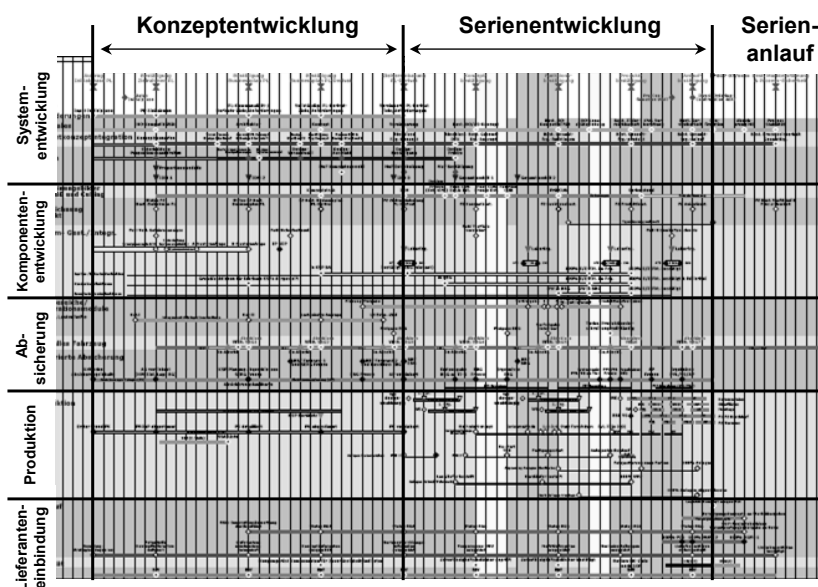


Bild 2-3: Ausschnitt eines komplexen Produktentwicklungsprozesses in der Automobilindustrie

Zusammenfassend bieten mechatronische Produkte eine Vielzahl von Vorteilen und ihre Bedeutung nimmt in sämtlichen Bereichen weiterhin zu. Dem gegenüber steht die hohe Komplexität sowohl des technischen Systems wie auch der mechatronischen Entwicklungsprozesse, die sich aus der inter- bzw. transdisziplinäre Aufgabenstellung und Projektbearbeitung ergibt. Diese Komplexität ist nicht vollständig vermeidbar sondern den mechatronischen Produkten und Entwicklungsprozessen inhärent und führt zu spezifischen Herausforderungen in der Entwicklung. Daher ist eine produkt- sowie prozesseitig Unterstützung mittels geeigneter Methoden, Tools und Hilfsmittel<sup>8</sup> erforderlich. Im Folgenden werden die sich ergebenden Herausforderungen weiter detailliert und ein erweitertes Problemverständnis abgeleitet.

## 2.2 Herausforderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme

Die hohe Integrationsdichte sowie die transdisziplinäre Vernetzung der Disziplinen Mechanik, Elektronik und Informationstechnik (vgl. Kap.3.1) erfordert eine umfassende methodische und werkzeugseitige Unterstützung des Entwicklungsprozesses über alle Phasen hinweg. Diese kann sich nicht auf klassische und etablierte Ansätze in den einzelnen Disziplinen beschränken, sondern muss vielmehr das vernetzte Zusammenwirken an einer gemeinsamen Aufgabe unterstützen um die angestrebten Synergien und Vorteile nutzbar zu machen. Es erfolgt zunächst eine Darstellung der zentralen Problemfelder und Herausforderungen Ergebnisse auf Basis einer literaturbasierten Recherche, die im Anschluss durch zwei praxisnahe Fallstudien unter Mitarbeit des Autors gestützt bzw. ergänzt werden.

Im Kap. 2.1 wurden Gründe für die hohe Komplexität mechatronischer Produkte angesprochen, die in der Folge eine erhöhte Prozesskomplexität nach sich ziehen. Die Beherrschung der besonderen Herausforderungen mechatronischer Entwicklungsprozesse ist von besonderer Bedeutung für die Wissenschaft und den wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen. Diese Aussage findet sich auch in einem von der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) am 4. März 2011 durchgeführten Workshop zum Thema „Smart Engineering“ wieder [EIGNER et al. 2012]. Darin wird die Transdisziplinarität<sup>9</sup> als eine zentrale branchenunabhängige Herausforderung dargestellt, da innovative Produkte der Zukunft zunehmend transdisziplinären Charakter besitzen. In Unternehmen mit einer nicht genügenden Berücksichtigung der transdisziplinären Prozessausrichtung über alle Phasen entstehen höhere Reibungsverluste, die sich durch tendenziell häufigere Überschreitungen der geplanten Projektzeit, dem Entwicklungs- sowie dem Projektbudget äußern [STETTER 2008]. Dies wird auch von einer im Jahre 2003 von Arthur D. Little durchgeführten Studie gestützt, in der 40% der befragten Unternehmen Probleme mit zu langen Produktentwicklungszeiten nannten [GAUSEMEIER & REDENIUS 2005, S.570]. In der gleichen Studie wurden erheblicher Entwicklungsmehraufwand (25 %) sowie Probleme mit der Qualität („Kinderkrankheiten“) (15 %) als weitere zentrale Problemfelder angegeben.

---

<sup>8</sup> Eine Definition dieser Begriffe wird in Kap. 3.1.4 vorgenommen.

<sup>9</sup> In der Quelle wird an dieser Stelle von Multidisziplinarität gesprochen. Aus dem Kontext sowie in Übereinstimmung mit der in Kap. 2.1 getroffenen Definition wurde hier der Begriff Transdisziplinarität verwendet.

BOCHER & HOULIHAN nennen unter anderem verkürzte Entwicklungszeitpläne, verringerte Entwicklungsbudgets sowie die Notwendigkeit zur Integration von Elektronik und Software als Hauptgründe von Unternehmen zur Optimierung ihrer mechatronischen Entwicklungsprozesse [BOUCHER & HOULIHAN 2008, S.6]. Als Hemmnisse, die einer Reduzierung der Entwicklungszeit entgegenstehen, nennt DOHMEN unterschiedliche disziplinspezifischen Beschreibungstechniken und Designmodelle, fehlende Standards zur Modellierung von interdisziplinären Beziehungen sowie fehlendes interdisziplinäres Wissen bei Experten [DOHMEN 2002]. Als weitere typische Probleme werden unterschiedliche Konstruktionsmethoden sowie geeignete mechatronische Produkt und Prozessmodelle genannt [EIGNER et al. 2012]. Ergänzend sind die Ergebnisse einer von der Aberdeen Group durchgeführten Studie in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Zentrale Herausforderungen in der Mechatronikentwicklung [nach BOUCHER & HOULIHAN 2008]

Herausforderungen	zutreffend für
Erfahrene Systemingenieure sind schwer zu finden/ Mangel an funktionsübergreifendem Know-how	50%
Frühzeitige Ermittlung von Problemen auf Systemebene	45%
Sicherstellung der Erfüllung sämtlicher Anforderungen im Endprodukt	40%
Schwierigkeiten bei der Simulation bzw. Modellierung des Produktverhaltens bis zum eigentlichen Prototypenbau	32%
Schwierigkeiten bei der Implementierung einer integrierten Lösung zur Produktentwicklung für alle an der Entwicklung beteiligten Disziplinen	28%
Auswirkungen von Änderungen auf andere Fachdisziplinen sind kaum nachvollziehbar	28 %
Auswirkungen von Änderungen auf andere Fachdisziplinen sind kaum nachvollziehbar	18 %

In der Folge dieser Erkenntnisse gibt PERRIN als wesentliche Herausforderungen bzw. Kennzeichen einer effektiven mechatronischen Entwicklung die disziplinübergreifende Konstruktion und Entwicklung, die Verwaltung der Kommunikation und der Arbeitsabläufe sowie die effektive frühzeitige Validierung an [PERRIN 2010]. Dies deckt sich mit den Folgerungen von JACKSON, der als zentrale Herausforderungen die Synchronisation von mechanischen und elektrischen Modellierungen (design representations), die unterschiedlichen eingesetzten Datenmanagementtools sowie unterschiedliche Entwicklungsprozesse sieht [JACKSON 2006]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die getroffenen Aussagen auf Probleme bzw. das Erreichen einer effizienten und effektiven Zusammenarbeit der Disziplinen abzielen.

Die Schwierigkeiten in der Planung und Durchführung mechatronischer Entwicklungsprozesse liegen in der Vielzahl von sequentiellen und parallelen Abhängigkeiten, die konsequent berücksichtigt werden müssen [LIPPOLD 2001, S.21]. Daher schlägt bereits VAN BRUSSEL einen integrierten Concurrent-Engineering Ansatz vor, der die Belange aller beteiligten Disziplinen von Anfang an berücksichtigt [VAN BRUSSEL 1996]. Dieser Grundgedanke findet sich auch bei [ISERMANN 1996] sowie in der VDI-Richtlinie 2206 [VDI 2004] wieder.

Es existieren eine Vielzahl von Ansätzen zur Unterstützung der mechatronischen Entwicklung, diese sind jedoch meist zu generisch und stellen nur ein abstraktes Hilfsmittel zur Planung zur Verfügung, welches sich bis auf Tätigkeitsebene erstreckt [REDENIUS 2006]. Die

Entwicklungsarbeit erfolgt daher oft unsystematisch, da erforderliche Methoden nicht genügend implementiert sind und das Entwicklungsgeschehen nicht transparent ist [BALAZOVA 2004]. In Folge werden Arbeiten mehrfach durchgeführt und Möglichkeiten zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung werden nicht erkannt. Daneben führt BALAZOVA den fehlenden Zugriff auf Informationen an, der zu einer schlechten Koordination und Kommunikation innerhalb der Entwicklung sowie anderen Bereichen führt. So ist die Kommunikation zwischen Entwicklung und Absicherung häufig nicht genügend ausgeprägt [KLEEDÖRFER 1999; HERFELD 2007].

BALAZOVA identifiziert außerdem Schwierigkeiten bei der Planung bzw. eine unsystematische Prozessplanung, die aus der Verschiedenartigkeit der Disziplinen resultiert. Die unterschiedlichen Begriffswelten, Denk- und Vorgehensweisen stehen einer verbesserten integrativen Zusammenarbeit entgegen [SCHÖN 2000, S.51]. Dem überwiegend bauteilorientierten Denken der Maschinenbauer steht eine funktionsorientierte Denkweise in der Software- und Elektronikentwicklung gegenüber [GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000, S.50]. Daher fordert JANSCHKEK eine Verzahnung von systemtheoretischem Wissen mit physikalisch-technologischem Wissen unterschiedlicher Wissenschaftsdomänen [JANSCHKEK 2010]. Die Bauteilorientierung ist zudem für die Mechatronik nicht mehr ausreichend und erfordert daher strukturbedingt eine stärkere Funktionsorientierung [BRAESS 2006; STEFFEN & JILG 2009; WARKENTIN 2010].

Verstärkt wird diese Thematik durch stark getrennte Prozesswelten der involvierten Disziplinen [REICHART 2005], sowie die unterschiedliche Entwicklungsdynamik von elektrischen und softwaretechnischen gegenüber mechanischen Komponenten (Bild 2-4). Die deutlich kürzeren Innovations- und Produktlebenszyklen der Elektronik- und Softwareanteile bieten Potenziale [EHLERS 2000; VDI 2004] erschweren jedoch durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten und die Anzahl an Zwischenversionen die Integration und Synchronisation der Einzelprozesse sowie die Abschätzung von Änderungsauswirkungen [PROSTEP 2009; EIGNER et al. 2012]. Die mangelnde disziplinübergreifende Kommunikation schlägt sich außerdem in einem mangelhaften Verständnis der strukturellen Abhängigkeiten zwischen den Systembereichen nieder [SOSA et al. 2007]. Die optimale Gestaltung der Organisationsstruktur sollte die spezifischen Merkmale der geänderten Produktstruktur berücksichtigen [EVERSHEIM & SCHUH 2005; EHRENSPIEL 2006, EPPINGER & SALMINEN 2001].

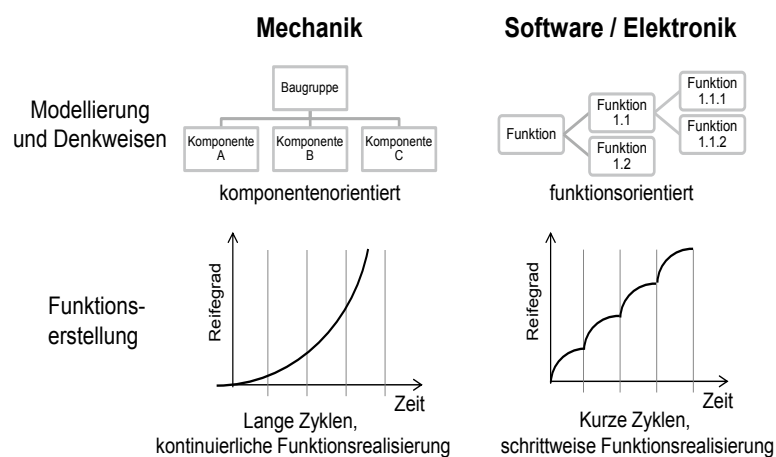


Bild 2-4: Unterschiedliche Denk- und Vorgehensweisen der Disziplinen

Eine Vielzahl der beschriebenen Probleme äußert sich häufig erst in den späteren Phasen der Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung (Verifikation und Validierung), in denen sie zu aufwändigen und kostspieligen Änderungen und Iterationen führen. WALTHER gibt als Gründe dafür „*die unzureichende Abstimmung des Gesamtsystems während der Entwicklung der Einzelkomponenten*“ an [WALTHER 2001]. Eine Ursache dafür ist, dass trotz umfangreichen Wissens über Komponenten- oder Teilsystemverhalten die vielseitigen funktionalen Wechselwirkungen und dynamischen Abhängigkeiten nur schwer zu beherrschen sind [Braess & Seiffert 2007, S.597]. Mechatronische Produkte können nur dann immer günstiger, zuverlässiger und flexibler werden, wenn Absicherungen in einer sehr frühen Phase des Entwurfsprozesses und über die traditionellen Grenzen der Disziplinen hinweg durchgeführt werden können [BOLTON 2003]. DIEHL stellt fest, dass in einem übergreifenden Entwicklungsprozess die disziplinspezifischen Entwicklungsergebnisse fristgerecht und mit der benötigten Reife zusammengeführt und integriert werden müssen, dabei den verantwortlichen Entwicklern jedoch häufig unklar ist, welche Ergebnisse wann und in welcher Form benötigt werden [DIEHL 2009, S.3]. In vielen Firmen ist das Wissen über die spezifischen Anforderungen der einzelnen Disziplinen nicht vorhanden, was sich beispielsweise in einer ungenügenden Anforderungsdefinition von Softwarekomponenten sowie mangelndem Wissen über deren systematisches Testen äußert [STETTER 2008].

Die aufgeführten Probleme und Herausforderungen erfordern eine systematische Unterstützung durch geeignete Entwicklungsmethodiken, Hilfsmittel und Tools. Diese sind heutzutage nicht oder erst in Ansätzen vorhanden. EIGNER ET AL. nennen den Mangel an „*einer Methodik für die disziplin- bzw. fachübergreifende Entwicklung softwarebasierter Systeme und damit auch innovativer, intelligenter und vernetzter Produkte. Darüber hinaus mangelt es an IT-Werkzeugen zur interdisziplinären Abstimmung und Synchronisation der verschiedenen Fachdisziplinen*“ [EIGNER et al. 2012, S.2]. Sie folgern daraus die Notwendigkeit zum Überdenken vorhandener Methoden, Prozesse, Werkzeuge und Organisationsformen und deren Unterstützung durch geeignete disziplinübergreifende IT-Werkzeuge [EIGNER et al. 2012]. Gleichzeitig weist WEBER darauf hin, dass die Komplexität ebenfalls durch die Vielzahl von Werkzeugen und Tools weiter erhöht wird und diese nicht zu ihrer Beherrschung beitragen [WEBER 2005b]. Dies muss bei der Entwicklung neuer Ansätze und Tools zur Unterstützung der mechatronischen Produktentwicklung berücksichtigt werden.

### **Ergebnisse der Studie Mechatronikentwicklung in der Automobilindustrie**

Im Rahmen des Industrieprojektes „MechaTUM“ (siehe Kap. 1.3) wurden in einer interviewbasierten Studie verschiedene Problemstellungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte innerhalb der industriellen Serienentwicklung identifiziert. Die zentralen Ergebnisse wurden bereits bei [DIEHL et al. 2008] sowie [DIEHL 2009, S.65ff] detailliert dargestellt, so dass an dieser Stelle nur ein Überblick der für die betrachtete Problemstellung relevanten Aspekte gegeben wird.

Es wurde eine integrierte Betrachtung und Analyse von Produktstruktur, Entwicklungsprozess und Aufbauorganisation vorgenommen, deren wechselseitige Abhängigkeiten von verschiedenen Autoren betont wird [EVERSHEIM et al. 1995; GRABOWSKI & GEIGER 1997; GÖPFERT 1998; KLEEDÖRFER 1999; BALDWIN & CLARK 2000; EPPINGER & SALMINEN 2001; SOSA et al. 2004; COLFER & BALDWIN 2010; MACCORMACK et al. 2010; GOKPINAR et al. 2010]. Au-

ßerdem wird herausgestellt, dass die Betrachtung fachübergreifender Kommunikations- und Informationsflüsse häufig die Identifikation von Verbesserungspotenzialen erlaubt [GÖPFERT 1998, S.144f]. Eine perfekte Übereinstimmung ist dabei jedoch nicht gewollt oder sogar unvorteilhaft [SOSA et al. 2004; HOETKER 2006]. Es lässt sich in jedem Fall festhalten, dass bei zu geringer Übereinstimmung bzw. gemeinsamen Betrachtung sehr häufig Qualitätsprobleme festgestellt werden können [GOKPINAR et al. 2010].

Es wurde daher eine integrierte Analyse von Produktstruktur, definiertem Sollprozess, Organisationsstruktur und gelebtem Prozess vorgenommen [DIEHL 2009, S.66]. Die Betrachtungen wurden an der Entwicklung eines schlüssellosen Zugangssystems (Comfort Access) sowie eines Schiebebedachs betrachtet. Zur Modellierung und Analyse der Systeme wurden die methodische Systemmodellierung (Relationsorientierte Funktionsmodellierung ([PONN & LINDEMANN 2011]), Funktionshierarchie und Systemelementzuordnung [WARKENTIN 2010], Wirkstruktur [GEHRKE 2005] sowie Multiple-Domain Matrizen [LINDEMANN et al. 2008]) verwendet. Die Datenerfassung erfolgte durch direkte Befragung, Dokumentenanalyse und Auswertungen in vorhandenen Tools (PDM, PLM, CAX). Auf die im Projekt identifizierten Problemfelder und Herausforderungen wird im Folgenden eingegangen.

- **Wandel der Produktstruktur des Automobils:** Elektrische und softwaretechnische Komponenten besitzen einen hohen Anteil in aktuellen Entwicklungen (siehe Bild 2-5). Ebenso liegt eine hohe Anzahl vernetzter Funktionen vor, die zu einer starken Vernetzung unterschiedlicher Systemelemente führt.
- **Erhöhte Transdisziplinarität<sup>10</sup>:** Die Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen hat erhebliche Auswirkungen auf Prozesse und Organisationsstrukturen. Neben den in der Literatur beschriebenen unterschiedlichen Begriffswelten, Erfahrungswissen und Vorgehensweisen [vgl. SCHÖN 2000, S.51] wurde ebenfalls die Problematik der unterschiedlichen Denkweisen (bauteilorientierten bzw. funktionsorientierte [vgl. GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000, S.50]) identifiziert. DIEHL folgert daraus die Notwendigkeit von Kompetenzen im gegenseitigen Verständnis der Disziplinen [DIEHL 2009, S.75].
- **Intransparente Prozessdarstellungen:** Die Verschiedenartigkeit der bestehenden Entwicklungsprozesse und Prozessdarstellung in den Disziplinen mit eigenen Begriffen führt zu Intransparenz. Die Prozessmodellierungen sind weiterhin losgelöst von der Produktstruktur. In Kombination mit disziplinspezifischen Freigabesystemen (bauteil- bzw. funktionsorientiert) führt dies zu Unklarheiten in Bezug auf disziplinübergreifende Integrations- und Absicherungsaktivitäten. Insgesamt ist eine mangelnde Förderung der interdisziplinären Kommunikation festzustellen.
- **Mangelnde Funktionsorientierung:** Es besteht Bedarf nach einer stärkeren funktionalen Ausrichtung der Entwicklung, da vorherrschende bauteilorientierte Prozess- und Organisationsstrukturen für die Beherrschung die Entwicklung komplexer mechatronischer System zunehmend nicht ausreichend geeignet sind [vgl. BRAESS 2006]. Aufgrund der Zu-

---

<sup>10</sup> Es wird an dieser Stelle in der Quelle von Interdisziplinarität gesprochen. Aus dem Kontext sowie in Übereinstimmung mit der in Kap. 2.1 getroffenen Definition wurde hier der Begriff Transdisziplinarität verwendet.



nahme der Bedeutung der Mechatronik wird dieser Paradigmenwechsel von BRAESS als Funktionsorientierung bezeichnet [BRAESS 2006].

- **Intransparente Verantwortungsstrukturen:** Es existiert aufgrund der Veränderung der Netzwerke in der Leistungserbringung ein Mangel an Transparenz in Bezug auf funktions- sowie bauteilorientierte Verantwortungsbereiche sowie deren Abhängigkeiten. Ebenso sind zentrale Kommunikationsstrukturen häufig nicht bekannt, die sich aus den Vernetzungen und Überlappungen der verschiedenen Bereiche ergeben bzw. ergeben sollten.
- **Ungenügende Komplexitätsreduktion durch Werkzeuge und Vorgehensweisen:** Die aktuell verwendeten Softwaresysteme und Tools sind häufig nicht geeignet eine Unterstützung zur Beherrschung der Komplexität zu bieten. Ebenso sind auf die transdisziplinäre Entwicklung ausgerichtete Methoden und Vorgehensweisen in den Prozessen nicht ausreichend berücksichtigt bzw. implementiert. Schließlich finden sich kaum geeignete Systemmodellierungen zur Schaffung eines transdisziplinären Systemverständnisses.

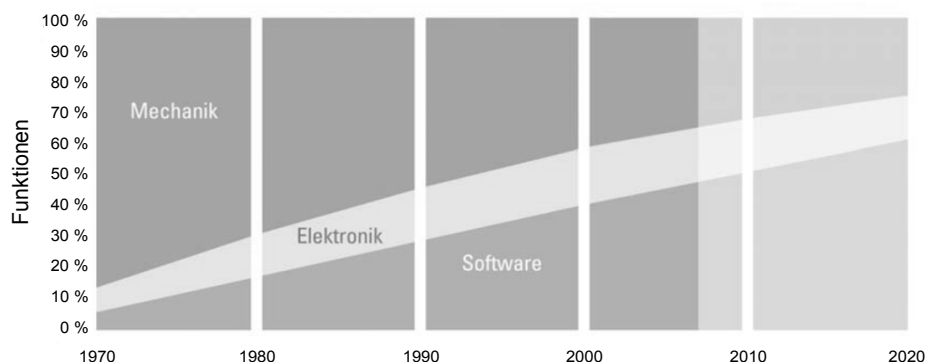


Bild 2-5: Wachsende Bedeutung mechatronischer Systeme [nach ITQ 2011]

### Ergebnisse der Studie Kostentransparenz in der Mechatronik

Im Rahmen der fragebogenbasierten Studie „Kostentransparenz in der Mechatronik“ [BRAUN et al. 2007b] (siehe Kap. 1.3) wurden primär Probleme und Herausforderungen des Kostenmanagements in mechatronischen Produktentwicklungen untersucht. Da ein hoher Anteil der Fragen sich unabhängig vom Kostenmanagement mit der Komplexität sowie deren Auswirkungen auf Produkt und Prozess befasst, können wesentliche Ergebnisse auf die in dieser Arbeit betrachtete Problemstellung übertragen werden. Die Studie war in insgesamt sechs Themenblöcke gegliedert, die jeweils separat sowie auf übergreifende Zusammenhänge hin analysiert wurden. Im Folgenden werden die relevanten Ergebnisse der Studie zusammengefasst.

Allgemein konnte eine Zunahme der **Produkt- und Prozesskomplexität** in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses festgestellt werden. Die Entwicklungsphase wird bezüglich ihrer Komplexität nach dem Anforderungsmanagement auf dem zweiten Platz eingestuft. Als wesentliche Ursache für eine erhöhte Produktkomplexität wurden steigende Anforderungen, die eine erhöhte Funktionsvielfalt erfordert, sowie Teilevielfalt, Interdisziplinarität und der hohe Vernetzungsgrad genannt. In Folge steigt ebenfalls die Prozesskomplexität, deren zent-

rale Treiber die Vielzahl der beteiligten Personen sowie deren Abhängigkeiten und Schnittstellen sind.

Im Bereich der **Zusammenarbeit** wurde festgestellt, dass die mechatronische Entwicklung über sämtliche Branchen hinweg eine deutliche Steigerung der interdisziplinären Zusammenarbeit in Bezug auf Zeit und Intensität erfordert. Weiterhin ist der Aufbau von interdisziplinärem Know-How notwendig. Die Bedeutung der Abstimmung zwischen den Disziplinen wird dadurch unterstrichen, dass mehr als die Hälfte der Befragtenangaben ca. 20% ihrer Arbeitszeit mit Abstimmungsaktivitäten zu verbringen. Die aufwendige Koordination und Zusammenarbeit wurde außerdem als zentraler Kostentreiber genannt.

In Bezug auf **Änderungsabhängigkeiten** wurden deren grundsätzliche Erkennbarkeit sowie die Schwierigkeit beim Erkennen von Auswirkungen auf andere Bereiche als wesentliches Problem genannt. Gleichzeitig gaben 80% an, dass ihrer Produkte viele bis sehr viele Änderungsabhängigkeiten aufweisen.

Die Bedeutung von **funktionsabsichernden Maßnahmen** nimmt gerade in den Unternehmen mit komplexen Produkten stark zu. So nannten diejenigen Befragten, die eine hohe Prozesskomplexität angaben, auch einen gestiegenen Aufwand für die funktionsabsichernden Maßnahmen. Ihre Verbreitung ist in den letzten Jahren ebenfalls stark angewachsen und sie werden in ca. 80% der befragten Unternehmen eingesetzt. In Folge entfallen ca. 14% der Kosten auf die Durchführung der Funktionsabsicherung, in der Automobilindustrie sogar noch deutlich mehr.

Als Fazit der Analyse von Herausforderungen und Problemfeldern in der Entwicklung mechatronischer Produkte lässt sich festhalten, dass die in der Literatur beschriebenen Problemfelder und Herausforderungen sehr gut mit den Ergebnissen der Befragungen in der Praxis übereinstimmen. Durch die Vielzahl von betrachteten Ansätzen und Unternehmen kann von einer hohen Allgemeingültigkeit der gewonnenen Erkenntnisse und dem daraus resultierenden Handlungsbedarfs ausgegangen werden.

## 2.3 Folgerungen für die Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse

Aus den dargestellten Herausforderungen und Problemfeldern in der Mechatronikentwicklung ist erkennbar, dass eine Vielzahl der identifizierten Probleme aus einer ineffektiven und ineffizienten Zusammenarbeit der Disziplinen resultiert. LINDEMANN fordert grundsätzlich ein strukturiertes, systematisches und von Methoden unterstütztes Vorgehen bei der Entwicklung technischer Produkte [LINDEMANN 2009]. Dieses ist in den Einzeldisziplinen sehr gut implementiert (siehe Kap. 3.1) und führt zu funktionsfähigen und wettbewerbsfähigen Lösungen, jedoch unterscheiden sich die (historisch gewachsenen) Vorgehensweisen, Modellierungssprachen und Begriffe teilweise sehr stark voneinander. Es fehlt an geeigneten disziplinübergreifenden Methoden, Prozessen und IT-Werkzeugen zur Unterstützung des transdisziplinären Zusammenwirkens der Disziplinen. Es besteht somit trotz der Vielzahl an vorhandenen Ansätzen in Forschung und Industrie (siehe Kap. 3.5) ein intensiver Forschungsbedarf auf diesem Gebiet [vgl. auch EIGNER et al. 2012].

In der Unterstützung der Entwicklung mechatronischer Produkte kann grundsätzlich zwischen Ansätzen zur **Beherrschung komplexer Produkte** sowie zum Umgang mit **komplexen Prozessen** unterschieden werden<sup>11</sup>. In einer aktuellen Studie wurden bei führenden Unternehmen (best in class) die Verbesserung der disziplinübergreifenden Kommunikation, die Steigerung der Wahrnehmbarkeit des Status der Anforderungen, sowie die Einführung bzw. Anpassung von multidisziplinären Entwicklungsprozessen als erfolgreiche Strategien identifiziert [BOUCHER & HOULIHAN 2008, S.9]. In einer weiteren Studie wurden die integrative Betrachtung disziplinübergreifender Entwicklungsprozesse, die Verbesserung der Visualisierungstechnik sowie die Formalisierung von disziplinspezifischen Entwicklungsprozessen als zielführende Maßnahmen in der Entwicklung genannt [JACKSON 2006]. In der gleichen Studie nannten 89 % der Unternehmen den Ausbau von internen disziplinspezifischen Kernkompetenzen, 75 % die Einführung oder Änderung der Entwicklungsprozesse und 41% die Veränderungen in der Organisationsstruktur als geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Mechatronikentwicklung. Hinzu kommt, dass in der industriellen Praxis die frühen Phasen zu wenig verstanden und daher häufig unstrukturiert sind [MORGAN & LIKER 2006]. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit eine Unterstützung des mechatronischen Entwicklungsprozesses angestrebt.

Es besteht ein grundsätzlicher Unterstützungs- und Informationsbedarf in den **frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses**, da bis zum Abschluss der Entwicklung ca. 80 % der Kosten festgelegt werden [EHRENSPIEL et al. 2007] bzw. im Falle von Softwareentwicklungen sogar bereits entstehen [ZIRKLER 2010, S.14]. Nach RIEPE umfassen die frühen Phasen die Potenzialfindung, die Produktfindung sowie die Produktkonzipierung [RIEPE 2003, S.17], die zum ersten Zyklus der Produktentwicklung<sup>12</sup> gehören. Die Prinziplösung<sup>13</sup> bildet die Schnitt- bzw. Übergabestelle zum zweiten Zyklus, der Entwurf und Ausarbeitung sowie Integration umfasst. An dieser Stelle kommt es häufig zu einem Bruch in der Entwicklung, da hier der Übergang von der domänenübergreifenden zur **domänenspezifischen Entwicklung** stattfindet. Die beschriebenen Probleme der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit treten jedoch verstärkt in den Phasen des zweiten Zyklus auf, da hier die beteiligten Disziplinen ausgehend vom Produktkonzept ihre jeweiligen Entwicklungsumfänge konkretisieren und dazu ihre eigenen Modelle und Vorgehensweisen verwenden. Hier ist demnach besonderer Unterstützungsbedarf gegeben. Die Notwendigkeit der Unterstützung in „späteren“ Phasen wird auch bei [FELGEN 2007] betont. Bezogen auf den gesamten Produktlebenszyklus kann jedoch die gesamte Entwicklungsphase zu den frühen Phasen gezählt werden.

Die disziplinübergreifende Zusammenarbeit führt nicht zwangsläufig zu Reibungsverlusten im Prozess. So stellen EISENBART & BLESSING fest, dass im Bauwesen die disziplinübergreifende Zusammenarbeit trotz hoher Arbeitsteilung und verschiedener Disziplinen keine grundlegenden Probleme auftauchen und untersucht, ob dortige Konzepte auf die Mechatronikentwicklung übertragen werden können [EISENBART & BLESSING 2011]. In Kombination mit den

---

<sup>11</sup> Diese Einteilung ist nicht überschneidungsfrei, sondern soll nur die grundlegende Ausrichtung der Unterstützung aufzeigen. Eine Betrachtung vorhandener Ansätze sowie deren Grenzen wird in Kap. 3.5 vorgenommen.

<sup>12</sup> GAUSEMEIER ET AL. fassen den Produktentstehungsprozess als Folge von drei übergeordneten Zyklen auf (strategische Produktplanung, Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung) [GAUSEMEIER et al. 2009b].

<sup>13</sup> In der Entwicklungsmethodik werden auch die Begriffe Lösungskonzept [VDI 2004; PONN & LINDEMANN 2011] oder prinzipielle Lösung [PAHL et al. 2007] synonym verwendet.

identifizierten Problemen bei der Planung, die in Folge zu unstrukturierten Entwicklungsabläufen und Effizienzverlusten führen (vgl. Kap. 2.2), ergibt sich der Bedarf nach einer **frühzeitigen und transparenten Planung** des mechatronischen Entwicklungsprozesses unter Berücksichtigung der jeweiligen **disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse** in den Phasen des domänenspezifischen Entwurfs sowie der Integration. Die Planung muss dabei so erfolgen, dass die einzelnen Entwicklungsstränge an geeigneten Stellen zusammengeführt werden um Abstimmungs- oder Integrationsaktivitäten durchzuführen und so einen effizienten und effektiven Gesamtprozess zu erhalten (siehe Bild 2-6). Dieser Grundgedanke findet sich in Form von „Quality bzw. Decision Gates“ ebenfalls im Systems Engineering (siehe Kap. 3.2.3), im Projektmanagement (Kap. 3.4.1) sowie speziell im Projektmanagement mechatronischer Produkte bei [GEISBERGER & SCHMIDT 2005] (siehe Kap. 3.5).

Der Entwicklungsprozess wird von GÖPFERT abstrakt als Abfolge iterativer Zyklen (Lösung generieren, Lösungen evaluieren, Lösungen kritisieren) beschrieben [GÖPFERT 1998, S.76FF]. Das Grundverständnis wiederkehrender Zyklen findet sich in erweiterter Form auch im Sonderforschungsbereich 768 - Zyklenmanagement von Innovationsprozessen (siehe Kap. 1.3) wieder. Hier werden unter anderem Auslöser, Verläufe und Auswirkungen von externen und internen Zyklen in Entwicklungsprozessen aus verschiedensten Bereichen analysiert [LANGER et al. 2011]. Die Anzahl der durchlaufenen Zyklen sowie deren Dauer ist somit ein Maß für die Effizienz des Entwicklungsprozesses. In dieser Arbeit werden daher Zyklen fokussiert, die aus der Zusammenarbeit der Disziplinen resultieren um diese präventiv zu vermeiden bzw. möglichst kurz zu gestalten. Unter **Synchronisation** ist somit zu verstehen, die unterschiedlichen Zyklen der disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse durch deren geeignete Anordnung und Abfolge aufeinander abzustimmen und so zu einem Gesamtoptimum zu gelangen. Hierbei kann zwischen der **Synchronisation in der Planung** (präskriptive Beschreibung der Abfolge und Verknüpfung von Entwicklungsaktivitäten), sowie **entwicklungsbegleitender Synchronisation** (deskriptive Darstellung relevanter Abhängigkeiten) unterschieden werden.

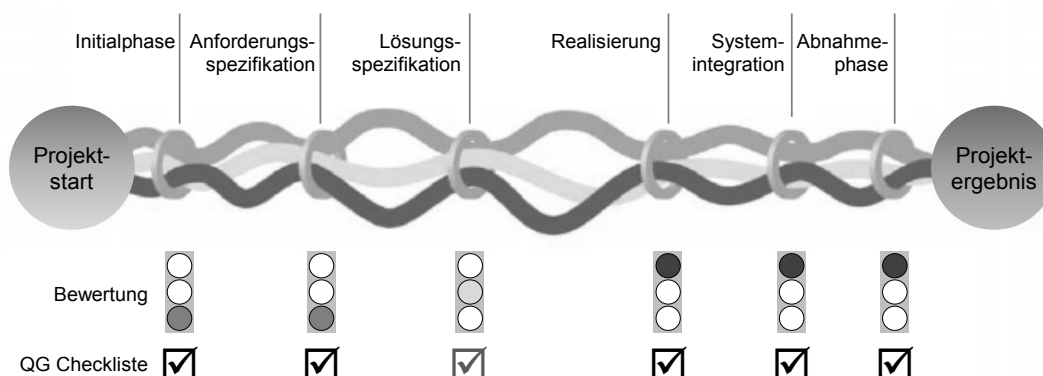


Bild 2-6: Prinzipielle Darstellung der Synchronisation in der Mechatronik [nach GEISBERGER & SCHMIDT 2005]

Bei der Planung ist zu berücksichtigen, dass es nach DÖRNER „keine kanonisierbare Optimalform des Konstruktionsprozesses, der der Entwickler in einem festen Ablaufplan folgen kann“ gibt [DÖRNER 1994, S.159]. Daraus folgt, dass stets eine Anpassung von Entwicklungsprozessen

sen auf die bestehenden Randbedingungen notwendig ist. Eine Unterstützung kann beispielsweise durch die Erfassung der spezifischen Situation des Entwicklers und dem Angebot geeigneter Handlungsoptionen aus einem definierten Prozessmodell erfolgen (vgl. [MEERKAMM et al. 2009; ROELOFSEN 2011]). Eine weitere Möglichkeit besteht in der Betrachtung des Entwicklungsprozesses auf einer **abstrakten, strukturellen Ebene**. Hierbei wird lediglich die Struktur<sup>14</sup> des Prozesses und nicht die Inhalte einzelner Entwicklungsaktivitäten betrachtet. Nach [MAURER 2007, S.17] bestimmt die Struktur die Eigenschaften und das Verhalten von Produkten und Prozessen. Die Kenntnisse über die Struktur führen somit häufig zu einem verbesserten Verständnis des Systems, woraus passende Schlussfolgerungen abgeleitet werden können [LINDEMANN et al. 2008, S.8F]. Zur Beschreibung der Struktur sind im hier betrachteten Anwendungsfall die Elemente **Entwicklungsaktivitäten, Meilensteine** sowie **Personen** relevant. Mit Kenntnis der Struktur können die, teilweise bisher unbekannt, Abhängigkeiten zwischen diesen Elemente von Beginn der Prozessplanung berücksichtigt bzw. entwicklungsbegleitend genutzt werden. Durch eine geeignete **Visualisierung** der Struktur kann zudem die **Transparenz** sowohl für koordinierende, wie operative Prozessbeteiligte erhöht werden. Bei struktureller Betrachtung wird weiterhin trotz der stark getrennten Prozesswelten der Disziplinen eine **integrierte Prozesssichtweise** ermöglicht, wie sie von REICHART gefordert wird [REICHART 2005].

Eine **vollständige Integration** der disziplinspezifischen Prozesse in einen übergreifenden mechatronischen Entwicklungsprozess ist hingegen **nicht notwendig bzw. zielführend**. So merkt JACKSON an, dass kein Bedarf nach einer Integration von Organisationseinheiten oder Entwicklungsprozessen besteht, sondern stattdessen weitgehend unabhängige disziplinspezifische Prozesse bestehen bleiben sollen [JACKSON 2006]. Die Prozesse der Disziplinen sind vielmehr gewollt unterschiedlich, es müssen jedoch ihre spezifischen Charakteristika bei der Synchronisation berücksichtigt werden [BENDER 2005; PROSTEP 2009, S.22F]. Führende Unternehmen führen hingegen die formale Dokumentation von disziplinübergreifenden Integrationsthemen durch und informieren die Entwickler, falls Änderungen in einer anderen Disziplin ein von ihnen bearbeitetes Teilsystem betrifft [BOUCHER & HOULIHAN 2008]. EIGNER ET AL. sehen im „Systems Engineering“<sup>15</sup> als integrative Methode eine Möglichkeit zur Bildung einer Brücke zwischen den Ingenieurswelten [EIGNER et al. 2012].

Die Orientierung der Entwicklung an Bauteilen bzw. Komponenten ist nicht geeignet für die Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme (vgl. Kap. 2.2). Die funktionsorientierte Entwicklung oder **Funktionsorientierung**<sup>16</sup> wird daher von diversen Autoren gefordert, um den spezifischen Herausforderungen mechatronischer Produkte begegnen zu können [vgl. BRAESS 2006; STEFFEN & JILG 2009; DIEHL 2009; WARKENTIN 2010; EIGNER et al. 2012]. Auch HERFELD stellt in der industriellen Praxis eine zu starke Ausrichtung der Prozessmodelle an der Reife der Komponenten fest und fordert eine stärkere Orientierung an den zu entwickelnden Funktionen und Eigenschaften [HERFELD 2007, S.46]. Ebenso sollte die Orientie-

---

<sup>14</sup> Definition des Begriffs Struktur siehe Kap. 3.2

<sup>15</sup> Grundlagen des Systems Engineering siehe Kap. 3.2

<sup>16</sup> WARKENTIN weist darauf hin, dass eine Abgrenzung zum Begriff der Funktionsorientierung aus der Unternehmensorganisation vorgenommen werden muss [WARKENTIN 2010]. Dieser bezieht sich auf eine funktionale Arbeitsteilung und eine entsprechende Ausrichtung der Aufbauorganisation [vgl. GAUSEMEIER et al. 2009b]. Im Rahmen dieser Arbeit wird hingegen das zu entwickelnde technische System selbst betrachtet.

rung am Kunden eine zentrale Leitlinie in der Entwicklung darstellen, da der Kunde die erbrachte Funktionalität als wesentliches Qualitätsmerkmal ansieht [FELGEN 2007, S.2f]. Daraus folgt die Notwendigkeit der **Funktionsstrukturierung aus Sicht des Kunden**. Dies passt mit der Wahrnehmung des Kunden zusammen, der in der Regel nur an der Erfüllung der mechatronischen Funktionen und nicht an den technischen Teilfunktionen sowie dem Zusammenwirken der Komponenten interessiert ist.

Eine alleinige Betrachtung des Entwicklungsprozesses ist jedoch nicht ausreichend. So untersuchten bereits PIMMLER & EPPINGER die Abhängigkeiten von Teamstrukturen und dem entwickelten System zur Verbesserung des Systemverständnisses und EPPINGER & SALMINEN fordern eine gemeinsame Ausrichtung von Prozess-, Organisationsstruktur sowie der Produktarchitektur<sup>17</sup> zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit [PIMMLER & EPPINGER 1994; EPPINGER & SALMINEN 2001]. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit einer **integrierten Sichtweise von technischem System und zugehörigem Entwicklungsprozess**. Hierbei müssen die unterschiedlichen Sicht- und Denkweisen der Disziplinen (funktions- bzw. bauteilorientiert, vgl. Kap. 2.2) berücksichtigt werden. Die Verknüpfung von funktionaler und komponentenorientierter Sichtweise wird auch von [GÖPFERT 1998] gefordert. Die **Produktmodellierung** muss somit eine **funktionsorientierte sowie eine bauteilorientierte Sichtweise** und deren Verknüpfung ermöglichen.

Zusammenfassend wird somit ein Ansatz zur **integrierten und funktionsorientierten Planung und Synchronisation des Entwicklungsprozesses** benötigt. Diese soll dabei sowohl strukturelle Abhängigkeiten innerhalb des Prozesses (Prozessmodell) sowie innerhalb des Produktes (Produktmodell, Architektur) berücksichtigen und so zu einer optimalen Verknüpfung der disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse gelangen (siehe Bild 2-7). Damit kann das von EHRENSPIEL als „Mauerdenken“ beschriebene Phänomen in der Mechatronik durch eine abstrakte disziplinübergreifende Betrachtung aufgelöst werden, wie es bereits von KALLMEYER gefordert wird [EHRENSPIEL 2006; KALLMEYER 1998].

---

<sup>17</sup> Unter der Architektur eines Produktes wird hier die Abbildung von Funktionen auf physische Komponenten sowie deren Interaktion verstanden [ULRICH & EPPINGER 2003]. Somit besitzt jedes Produkt eine Architektur, auch wenn diese nicht explizit in der Entwicklung berücksichtigt bzw. adressiert wurde [vgl. LANNER & MALMQVIST 1996; JIAO & TSENG 2000]. Eine Grundübersicht von verschiedenen Architekturen in Bezug auf die möglichen Verknüpfungen von Funktionen und Komponenten ist bei [ULRICH 1995] zu finden.

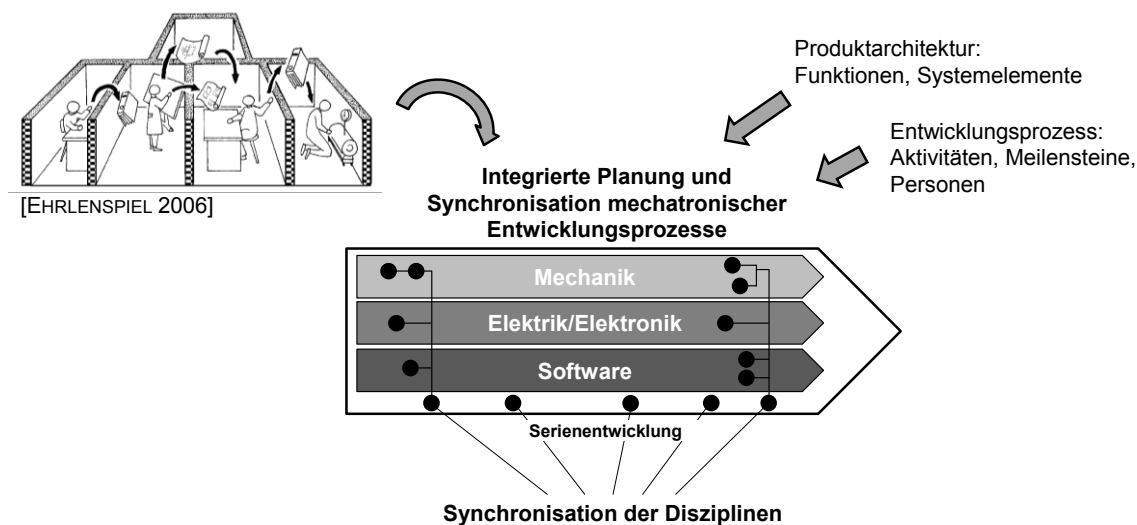


Bild 2-7: Integrierte, funktionsorientierte Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse

Eine weitere Forderung an den integrierten Ansatzes ist die Erhöhung des **Systemverständnisses** und die Schaffung von **Transparenz**. Durch das erweiterte Verständnis von Produkt und Prozess sollen die Prozessbeteiligten in die Lage versetzt werden **disziplinübergreifende Änderungsabhängigkeiten im Produkt wie auch im Prozess** zu identifizieren und zu verstehen. Auf diese Weise können sie erkennen, welche Arbeitsergebnisse zu welchem Meilenstein vorliegen müssen und welche Entwicklungsschritte dazu in anderen Disziplinen erforderlich sind. Die Vorteile der **Visualisierung von Abhängigkeiten** gegenüber der Angabe von Kennzahlen wurde auch im Rahmen der Unterstützung des Lean Development festgestellt [REIK et al. 2011].

An dieser Stelle sollen weiterhin erforderliche **Voraussetzungen und Rahmenbedingungen** diskutiert werden (siehe auch Anhang 9.5). Zunächst die zeitliche Einordnung in den Produktentstehungsprozess vorzunehmen. In erster Linie werden die Phasen des **domänenspezifischen Entwurfs** sowie die folgende **Systemintegration** adressiert. Diese auf die Konzeptionierung folgenden Schritte werden auch als **Serienentwicklung** bezeichnet und zählen somit innerhalb der Entwicklung eher zu den „späten“ Phasen.

Diese zeitliche Fokussierung ist eng damit verknüpft, dass das **Lösungsprinzip bzw. die Architektur des Produktes** (Funktionen und Komponenten sowie deren Verknüpfung) **im Wesentlichen als bekannt** vorausgesetzt werden. Es sind in gewissen Rahmen noch Änderungen der Architektur zugelassen (siehe Kap.3.2.2), jedoch sollte die Grundstruktur erhalten bleiben. Ebenso werden die für die **Entwicklung notwendigen Entwicklungsschritte als bekannt** angenommen. Diese Rahmenbedingung kann insofern getroffen werden, da es sich in der Industrie bei einem Großteil der Entwicklungen um Anpassungs- oder Variantenkonstruktionen handelt, in denen das Lösungsprinzip bereits bekannt und etabliert ist [EHRENSPIEL 2006, S.245].

Es wird **keine Generierung einer übergreifenden mechatronischen Entwicklungsmethodik** oder eines **einheitlichen Entwicklungsprozesses** angestrebt. Dies bedeutet, es soll kein neues oder erweitertes Vorgehensmodell im Sinne der VDI 2206 oder anderen Ansätzen (vgl. Kap. 3.1) geschaffen werden. Somit findet auch **keine Anpassung oder Optimierung disziplinspezifischer Entwicklungsprozesse** statt. Es wurde stattdessen gezeigt, dass es zielführender ist die etablierten und bewährten Vorgehensweisen bestmöglich aufeinander abzustimmen.

Da eine einfache Anwendbarkeit des Ansatzes im industriellen Umfeld ermöglicht werden soll, wird ebenso **keine disziplinübergreifende Systemmodellierung** im Sinne einer modellbasierten Entwicklung angestrebt. Der Aufwand zur Erstellung und Pflege eines solchen umfassenden Modells ist sehr hoch und in den meisten Unternehmen sind die hierfür erforderlichen Rahmenbedingungen noch nicht vorhanden. Die im Verlauf des Entwicklungsprozesses erstellten Produktmodelle<sup>18</sup> werden als Eingangsinformation bzw. Ergebnisse der Entwicklungsaktivitäten betrachtet. Eine Modellierung oder Analyse des Modellinhalts findet nicht statt. Es finden ausschließlich strukturelle Betrachtungen der Abhängigkeiten von Produktarchitektur und Entwicklungsprozess statt. Diese können von den verwendeten Produktmodellen vorgegeben bzw. beeinflusst werden.

In Tabelle 2-2 sind zusammenfassend die wesentlichen identifizierten **Zielsetzungen** für die Unterstützung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse dargestellt. Daneben sind außerdem die zur Entwicklung bzw. Anwendung des Ansatzes getroffenen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen angegeben.

Tabelle 2-2: Darstellung der identifizierten Herausforderungen sowie der Rahmenbedingungen

Identifizierte Zielsetzungen zur Unterstützung der Mechatronikenwicklung
Unterstützung des domänenspezifischen Entwurfs und der Systemintegration
Ermöglichung einer frühzeitigen und transparenten Prozessplanung
Berücksichtigung disziplinspezifischer Entwicklungsprozesse
Synchronisation der Disziplinen (Planung und entwicklungsbegleitend)
Funktionsorientierte Gestaltung des Entwicklungsprozesses
Integrative Betrachtung von technischem Produkt und Entwicklungsprozess
Berücksichtigung von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten
Transparente Visualisierung zur Erhöhung der Systemverständnisses
Rahmenbedingungen und Voraussetzungen
Fokussierung auf Serienentwicklungsprozesse
Lösungsprinzip bzw. Architektur des technischen Systems sind bekannt
Notwendige Entwicklungsschritte sind bekannt
Einheitlicher mechatronischer Entwicklungsprozesses wird nicht angestrebt
Disziplinspezifische Entwicklungsprozesse sollen nicht angepasst bzw. optimiert werden
Keine Erstellung einer modellbasierten, disziplinübergreifenden Systemmodellierung

<sup>18</sup> Unter Produktmodellen werden formale Abbilder realer oder geplanter Produkteigenschaften verstanden [GRABOWSKI et al. 1993]. Beispiele sind Funktionsstrukturen, Lösungskonzepte, Skizzen, physische oder virtuelle Modelle (2D, 3D, Kinematik, etc.) oder Berechnungsmodelle [PONN & LINDEMANN 2011].



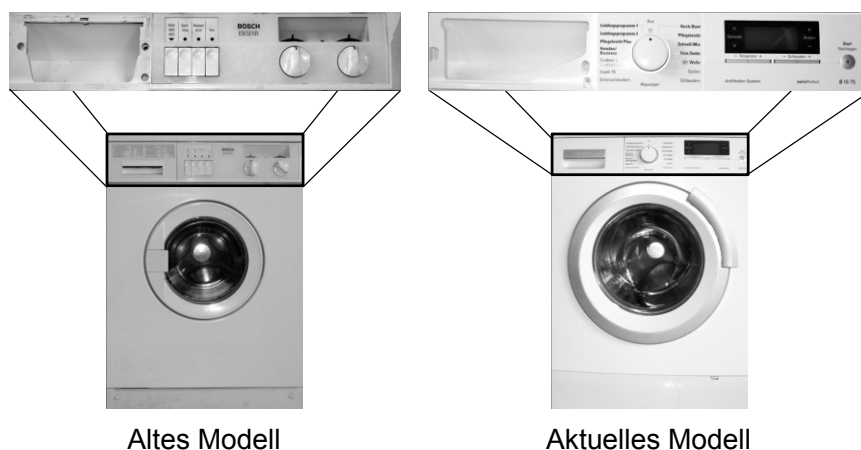
### 3. Stand der Forschung und Technik

*Im Anschluss an den aufgezeigten Handlungsbedarf bei der Entwicklung mechatronischer Produkte, wird im Folgenden der relevante Stand der Forschung und Technik aus den identifizierten Forschungsfeldern dargestellt. Das Kapitel ist entsprechend den in Kap. 1 dargestellten relevanten Forschungsfeldern in die Abschnitte „Entwicklung mechatronischer Produkte“, „Systemdenken und Systems Engineering“, „Komplexitätsmanagement“ sowie „Prozess- und Projektmanagement“ untergliedert. Den Abschluss des Kapitels bilden die Betrachtung existierender Ansätze zur Prozessunterstützung in der Mechatronikentwicklung sowie eine Zusammenfassung der aus der Betrachtung des Stands der Technik identifizierten Defizite zur Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse.*

*Die Grundlagen mechatronischer Produkte werden in diesem Kapitel anhand des Beispiels einer Waschmaschine dargestellt und erläutert. Damit soll gleichzeitig verdeutlicht werden, dass die Mechatronik in sämtlichen Produktbereichen und Branchen zu finden ist und dementsprechend eine hohe Bedeutung für entwickelnde Unternehmen besitzt.*

#### 3.1 Entwicklung mechatronischer Produkte

Die Produkte in industriellen Anwendungen sowie in alltäglichen Lebensbereichen sind einem Wandel unterworfen, der sich neben dem äußeren Erscheinungsbild auch auf Umfang und Vielfalt der Funktionen sowie die Art und Weise der Funktionserbringung erstreckt. In modernen maschinenbaulichen Produkten erfolgt die Realisierung der Funktionalität zunehmend über die Integration elektronischer und informationstechnischer Teilsysteme [vgl. JANSEN 2007, S.3; VDI 2004]. Diese mechatronischen Produkte besitzen gegenüber den meist mechanisch dominierten Ausgangsprodukten eine Reihe von Vorteilen wie erweiterten Funktionsumfang, gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit oder die Möglichkeit zur Anpassung an unterschiedliche Randbedingungen [vgl. Kap. 2.1]. Dieser Wandel hin zu mechatronische Produkten lässt sich anhand des Vergleichs einer Waschmaschine aus der Mitte der 1990er Jahre mit einem aktuellen Gerät des gleichen Herstellers zeigen (siehe Bild 3-1).



*Bild 3-1: Vergleich einer Waschmaschine mit mechanischer und elektronischer Steuerung*

Das Gerät aus den 1990er Jahren (links im Bild) besitzt eine rein mechanische Steuerung über mechanische Drehregler zur Programmauswahl, mechanische Schalter und Kurvenscheiben. Die Anzeige erfolgt ebenfalls rein analog über Zeiger an den Drehreglern. Das aktuelle Gerät ist hingegen mit elektrischen „Touch-Schaltern“ sowie einem Digitaldisplay zur Nutzerinteraktion ausgestattet. Ebenso ist die Steuerung vollständig elektronisch realisiert und besitzt einen erheblich gesteigerten Funktionsumfang (manuelle und automatische Waschprogramme). Sie ist zudem zur Erzeugung unterschiedlicher Varianten modular aufgebaut. Durch den Einsatz von speziellen Pumpen und Sensoren ist eine automatische und exakte Wasser- und Waschmitteldosierung und somit eine Verbrauchsreduzierung möglich [BSH 2012a; BSH 2012b]. Mit der vorhandenen Hardware können auch weitere Funktionen, wie spezielle Programme zu schonenden Behandlung der Wäsche oder Entfernung schwieriger Flecken, auch nach Beginn der Produktion bzw. während der Nutzung mit geringem Aufwand durch eine Änderung der Software nachgerüstet werden.

Anhand dieses Beispiels kann gezeigt werden, wie durch das Zusammenwirken von Teilsystemen aus unterschiedlichen Disziplinen ein erweiterter Kundennutzen (Funktionalität, Einsparungen) erzielt werden kann. Dieses Zusammenwirken der beteiligten Disziplinen im Produkt sowie im zugehörigen Produktentwicklungsprozess wird nach der Einführung grundlegende Definitionen im Folgenden detailliert dargestellt.

### 3.1.1 Grundlagen mechatronischer Produkte

Der Begriff „Mechatronik“ ist ein Kunstwort, das sich aus den Begriffen Mechanik (mechanism, später mechanics oder allgemeiner Maschinenbau) und Elektronik (electronics) ableitet. Er wurde ursprünglich vom Japaner Ko Kikuchi (Präsident der YASKAWA Electric Corporation) im Jahre 1969 geprägt und war in einem gewissen Zeitraum als Handelsname geschützt [HARASHIMA et al. 1996]. Mit dem Aufkommen der Mikroelektronik und besonders der Mikroprozessortechnik ist die Informationstechnik als weiterer Bestandteil hinzugekommen. Die Mechatronik nutzt somit Synergien aus dem Zusammenwirken der Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik [VDI 2004, S.10].

Eine einheitliche und allgemein akzeptierte Definition vom „Mechatronik“ hat sich bis heute nicht etabliert, es findet statt dessen eine stetige Weiterentwicklung des Begriffs im Sinne einer Technologieerweiterung statt [VDI 2004, S.10]. Dies ist nach ZIRKLER unter anderem darauf zurückzuführen, dass die existierenden Definitionen unterschiedliche Aspekte mechatronischer Systeme in den Vordergrund stellen [ZIRKLER 2010, S.18]. Im Folgenden werden einige Definitionen vorgestellt, die das Grundverständnis in dieser Arbeit wiederspielen.

In der Definition von BUUR werden das funktionale Zusammenwirken sowie die räumliche Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik als wesentliche Eigenschaften mechatronischer Produkte betont:

*„Mechatronics is a technology which combines mechanics with electronics and information technology to form both functional interaction and spatial integration in components, modules, products and systems“* [BUUR 1990, S.18].

Der Aspekt des integrativen Zusammenwirkens der Disziplinen wird in der Definition von BOLTON noch stärker unterstrichen. Nach BOLTON ist Mechatronik

*„... not just a marriage of electrical and mechanical systems and is more than a just a control system; it is a complete integration of all of them”* [BOLTON 2003, S.1].

ISERMANN betont neben den angestrebten Synergien, die sich aus dem Zusammenwirken der Disziplinen ergeben, zusätzlich die intensive Zusammenarbeit und Vernetzung der Disziplinen während der Entwurfs- und Integrationsphase:

*„Mechatronische Systeme entstehen durch simultanes Entwerfen und die Integration von folgenden Komponenten und Prozessen:*

- *Mechanische und mit ihr gekoppelte Komponenten/Prozesse*
- *Elektronische Komponenten/Prozesse*
- *Informationstechnik (einschließlich Automatisierungstechnik)*

*Die Integration erfolgt durch die Komponenten (Hardware) und durch die informationsverarbeitenden Funktionen (Software). Ziel ist dabei, eine optimale Lösung zu finden zwischen der mechanischen Struktur, Sensor- und Aktorimplementierung, automatischer digitaler Informationsverarbeitung und Regelung. Zusätzlich werden synergetische Effekte geschaffen, die erweiterte Funktionen und innovative Lösungen ergeben.“* [ISERMANN 2007, S.18]

Diese Definition bringt gleichzeitig zum Ausdruck, dass ggf. neben mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Prozessen beispielsweise ebenfalls optische, thermodynamische oder chemische Prozesse eine Rolle spielen und sich in entsprechenden Teilsystemen niederschlagen können [JANSEN 2007, S.7f].

Die Bedeutung der Integration der beteiligten Disziplinen im Rahmen des Entwurfs und der Produktion mechatronischer Produkte findet sich ebenfalls in der Definition von HARASHIMA ET AL., die auch im Rahmen der VDI 2206 übernommen wurde:

*„Mechatronics is the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes”* [HARASHIMA et al. 1996].

Aus den Betrachtungen lässt sich für diese Arbeit zusammenfassend festhalten, dass die wesentliche Zielsetzung der Mechatronik die Schaffung und Nutzung von Synergien durch die funktionale und räumliche Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik ist. Diese Synergien ergeben sich aus dem Zusammenwirken der Disziplinen und können in sich verbesserten bzw. erweiterten Funktionalitäten oder innovativen Produkten äußern. Die Entwicklung und Erstellung mechatronischer Produkte erfordert somit einen inter- bzw. transdisziplinären Produktentstehungsprozess. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Phasen der Produktentwicklung, die folgenden Schritte der Produktentstehung werden nicht betrachtet.

Die möglichen Anwendungs- und Einsatzgebiete mechatronische Systeme<sup>19</sup> sind extrem umfassend und sie bieten eine Reihe von Vorteilen (vgl. Kap. 2.1). Sie können nach GAUSEMEIER grundsätzlich in zwei Klassen unterteilt werden: Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem

---

<sup>19</sup> Eine Definition sowie Erläuterungen zum Begriff „System“ werden in Kap. 3.2.1 gegeben.

Bewegungsverhalten und Produkte, die auf der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik beruhen [GAUSEMEIER 2010, S.15]. Die Ziele der ersten Klasse liegen in der Verbesserung des Verhaltens des Systems, in dem Informationen über die Umgebung oder das System selbst aufgenommen und verarbeitet und dadurch eine „optimale“ Reaktion ausgelöst wird. Diese Systeme können dadurch gezielt auf Veränderungen in der Umgebung reagieren, eigenständig kritische Zustände erkennen oder Abläufe durch Einsatz von Regelungstechnik optimieren. Die Produkte der zweiten Klasse zielen auf eine hohe Dichte mechanischer und elektronischer Funktionsträger auf möglichst geringen Bauraum ab. Die wesentlichen Potentiale dieser Systeme liegen in der Miniaturisierung, geringen Herstellkosten sowie gesteigerter Zuverlässigkeit. Ebenso können in der Praxis Kombinationen aus beiden Klassen auftreten [GAUSEMEIER 2010].

Die Entwicklung im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik ermöglichen Systeme, die über eine inhärente Teilintelligenz verfügen. Diese von GAUSEMEIER ET AL. als **selbstoptimierend** bezeichneten **Systeme** besitzen die Fähigkeit, autonom und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren und ihre Parameter sowie ggf. ihre Struktur und damit ihr Verhalten entsprechend anzupassen [GAUSEMEIER et al. 2009a]. Weiterhin können **adaptronische Systeme** unterschieden werden, deren Funktionalität auf der Struktur und dem Verhalten von Multifunktionswerkstoffen, wie Piezoelemente oder Formgedächtnislegierungen, beruht [DUMITRESCU 2011, S.10]. Aktuelle Entwicklungen zielen auf die Integration kognitiver Funktionen in mechatronische Systeme ab, um ihnen dem Menschen vergleichbare Fähigkeiten hinsichtlich Flexibilität, Anpassbarkeit und Robustheit zu verleihen [METZLER & SHEA 2010]. Im Vergleich zu einfachen mechatronischen Produkten besitzen diese **kognitiven technischen Produkte** anpassungsfähige und flexible Regelkreise [BEETZ et al. 2007].

### 3.1.2 Aufbau und Struktur mechatronischer Systeme

Alle mechatronische Systeme besitzen nach VDI 2206 eine ähnliche Grundstruktur, die aus einem Grundsystem, Sensoren, Aktoren (oder auch Aktuatoren) und einer Informationsverarbeitung besteht (siehe Bild 3-2) [VDI 2004]. Das **Grundsystem** ist in der Regel mechanisch dominiert, kann aber auch elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Systeme bzw. eine Kombination von diesen umfassen. Im Allgemeinen ist jedes beliebige physikalische System denkbar [VDI 2004].

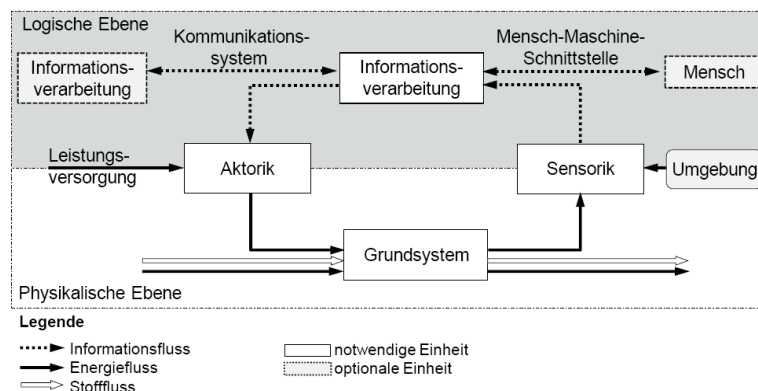


Bild 3-2: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [nach VDI 2004, S.14]

Die **Sensoren** dienen zur Bestimmung der Zustandsgrößen des Grundsystems sowie der Umgebung. Sie können als physische Messwertaufnehmer oder als Softwaresensoren (Beobachter) realisiert sein. Die Sensoren wandeln die aufgenommenen Messwerte in angepasste elektrische Signale, die als Eingangsinformationen für die **Informationsverarbeitung** dienen. In der Informationsverarbeitung, die in den meisten Fällen mittels digitaler Mikroprozessoren erfolgt, werden die notwendigen Einwirkungen und Stellgrößen zur gewünschten Beeinflussung des Grundsystems bestimmt. Die geeignete Beeinflussung des Grundsystems erfolgt über die **Aktorik**, in denen die Signale der Informationsverarbeitung in entsprechende Stellgrößen umgewandelt und auf das Grundsystem aufgebracht werden. Zusätzlich kann die Informationsverarbeitung über ein Kommunikationssystem mit andern Informationsverarbeitungen verknüpft sein. Ebenso ist über eine spezielle Mensch-Maschine Schnittstelle eine Kommunikation mit dem Menschen bzw. dem Systemanwender möglich. Die einzelnen Elemente bzw. Komponenten des mechatronischen Systems sind über unterschiedliche Flüsse und Flussarten miteinander verknüpft. Dazu können die Flussarten *Stofffluss*, *Energiefluss* und *Informationsfluss* nach [PAHL et al. 2007] verwendet werden [VDI 2004, S. 14F].

In komplexen mechatronischen Systemen sind in der Regel mehrere der dargestellten Grundstrukturen vorhanden die synergetisch zur Funktionserfüllung beitragen [siehe Bild 3-3]. Die beschriebene Grundstruktur bildet dabei einen Grundbaustein [VDI 2004, S.16] oder ein mechatronisches Funktionsmodul (MFM) [LÜCKEL et al. 2001]. Zwischen den einzelnen Funktionsmodulen mit ihren unterschiedlichen Funktionen können hierarchische und nicht-hierarchische Beziehungen vorhanden sein. Durch die mechanische und/oder informationstechnische Vernetzung verschiedener Funktionsmodule entsteht ein autonomes mechatronisches System (AMS). Dieses AMS kann eigenständig Handlungen ausführen und greift dazu auf die Sensorik bzw. Aktorik der einzelnen MFM zu. Zusätzlich kann eine eigene Sensorik und Informationsverarbeitung vorhanden sein. Auf dieser Hierarchiestufe können beispielsweise die Generierung von Vorgaben der enthaltenen MFM sowie Fehlerdiagnose- und Überwachungsfunktionen realisiert sein. Die informationstechnische Kopplung mehrerer AMS führt zu einem vernetzten mechatronischen System (VMS), mit dem weitere Aufgaben wie Lernvorgänge oder Adaption realisiert werden können. Die Struktur dieser Systeme ist abhängig von der Aufgabenstellung zu wählen und anzupassen [VDI 2004].

In Bild 3-3 ist diese Strukturierung mechatronischer Systeme am Beispiel der Waschmaschine dargestellt. Der geregelte bürstenlose Motor stellt ein mechatronisches Funktionsmodul dar, die Waschmaschine repräsentiert das autonome mechatronische System und ein Haushalt mit kommunikationsfähigen Haushaltsgeräten (Herd, Spülmaschine, Kühlschrank, etc.) bildet ein vernetztes mechatronisches System.

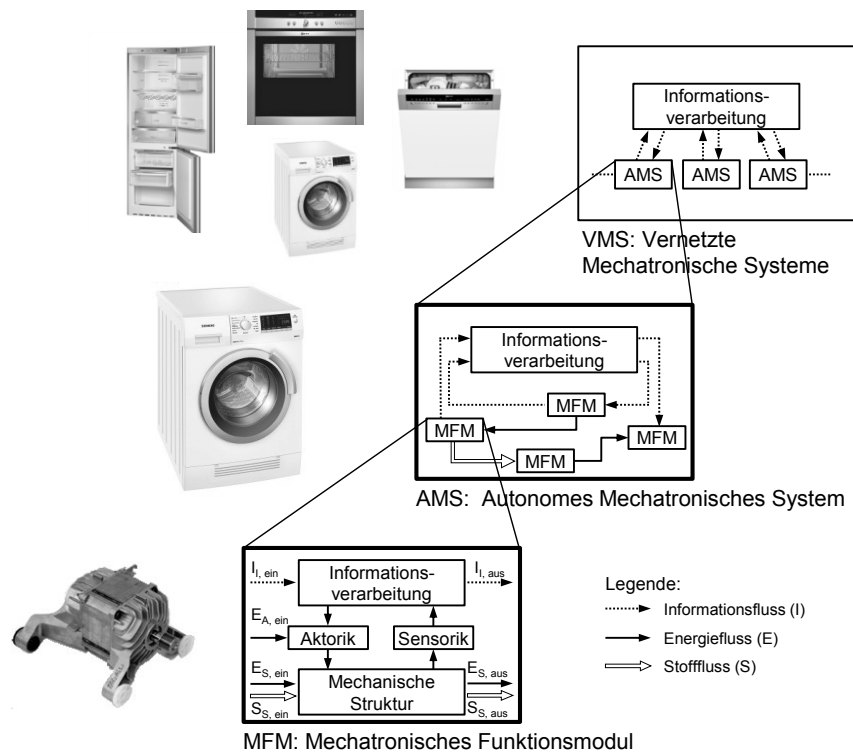


Bild 3-3: Strukturierung mechatronischer Systeme [nach LÜCKEL et al. 2001]

(Bilder: Mit freundlicher Genehmigung der Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH)

### 3.1.3 Zusammenwirken der Disziplinen in mechatronischen Systemen

Wie aus den Definitionen sowie der dargelegten Grundstruktur erkennbar ist, wirken im mechatronischen Gesamtsystem die verschiedenen Disziplinen synergetisch und in abgestimmter Weise zusammen. Auf diese Weise können die gewünschten Funktionalitäten sowie die dargestellten Vorteile erreicht werden (vgl. Kap. 2.1). Im Folgenden werden die am Entwurf mechatronischer Systeme beteiligten Disziplinen bzw. Domänen<sup>20</sup> sowie deren Zusammenwirken dargestellt. Die Beschreibungen sind [JANSEN 2007, S.23FF], [MICHELS 2006, S.34FF], [CZICHOS 2008, S.23FF] sowie [ZIRKLER 2010, S.23FF] entnommen und geben die für diese Arbeit relevanten Aspekte wieder.

#### Mechanik

Die Mechanik stellt ein Teilgebiet der klassischen Physik dar und bildet die Grundlage zur Realisierung von Bewegungen, Kräften und mechanischen Energieflüssen sowie deren mathematische Beschreibung mittels Naturgesetzen. Das Grundsystem mechatronischer Systeme

<sup>20</sup> Die am Entwurf beteiligten Disziplinen werden von [MÖHRINGER 2004] auch als mechatronische Domänen bezeichnet. Nach [DUDEN 2012] bezeichnet Disziplin einen speziellen Wissenschaftszweig, während unter Domäne ein Spezialgebiet, auf dem sich jemand besonders gut auskennt, zu verstehen ist. Die beiden Begriffe können daher im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet werden.

ist in vielen Fällen mechanisch dominiert. Über Betrachtungen zur Festigkeit können zulässige Belastungen, erforderliche Bauteilgeometrien und -abmessungen sowie geeignete Werkstoffe abgeleitet werden. Die wesentliche Aufgabe der Mechanik in der Entwicklung ist somit die Festlegung von Gestalt, Material und Anordnung der das mechatronische System repräsentierenden Körper. Sie umfasst alle Funktionen des Gesamtsystems, die unter Nutzung mechanischer Gesetzmäßigkeiten realisiert werden sollen. Dies beinhaltet bewegte Komponenten, die eine mechanische Leistung übertragen oder zugeführt bekommen, ruhende Teilsysteme, die nicht unmittelbar am Leistungsfluss beteiligt sind sowie passive Funktionen, die Lagerungs-, Stütz- oder Gehäuseaufgaben übernehmen. Die Domäne Mechanik kann bezüglich des Aggregatzustandes der beteiligten Körper in die Bereiche Festkörper- und Fluidmechanik unterteilt werden. Die Gebiete Hydraulik und Pneumatik, die auf einer kombinierten Nutzung festkörper- und fluidmechanischer Effekte basieren, können daher ebenfalls der mechanischen Domäne zugeordnet werden.

### **Elektrotechnik**

Die zentrale Funktion der Elektronik innerhalb des mechatronischen Systems liegt in der Informationsverarbeitung. Dies beinhaltet das Erfassen von Informationen über das System und seine Umwelt, das Bestimmen der erforderlichen Einwirkungen, um den gewünschten Zustand zu erreichen, und das Ansteuern der Aktoren. Darüber hinaus zählen auch die Anpassung, Wandlung und Verstärkung von Mess- und Ansteuersignalen zum Funktionsumfang der Elektronik [VDI 2004, S.14f], [ISERMANN 2007, S.5FF]. Sensoren und Aktoren stellen die Schnittstellen der Elektronik zum Grundsystem dar, indem sie nichtelektrische in elektrische Größen wandeln und umgekehrt [ISERMANN 2007, S. 413FF]. Die Hauptaufgabe der Elektronik innerhalb der Entwicklung ist somit der Entwurf elektronischer Schaltkreise und die Auswahl elektronischer Bauteile [MICHELS 2006, S.34]. Die Realisierung technischer Funktionen mittels Elektronik erfolgt durch die Verschaltung passiver und aktiver Bauteile mit definierten spezifischen Übertragungseigenschaften. Abhängig davon, ob in einem elektrischen Teilsystem der Energie- oder Informationsumsatz im Vordergrund steht, wird zwischen Leistungs- und Signalelektronik unterschieden. Darüber hinaus lässt sich je nach Art der Informationsrepräsentation eine Unterteilung in Analog- und Digitalelektronik vornehmen.

Durch die Nutzung elektrodynamischer Gesetzmäßigkeiten zur physikalischen Realisierung informationsverarbeitender Funktionen ist es möglich, hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten bei geringem Leistungsbedarf zu erzielen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zu mechanischen oder hydraulischen Prinzipien, wie sie früher zur Informationsverarbeitung zum Einsatz kamen, keine Massen bewegt werden müssen. Dies und die gute Miniaturisierbarkeit haben dazu geführt, dass die physikalische Ebene der Informationsverarbeitung heute fast ausschließlich durch die Elektrotechnik repräsentiert wird.

### **Informationstechnik**

In der Informationstechnik steht im Gegensatz zu den beiden oben beschriebenen Domänen nicht die gezielte Beeinflussung physikalischer Größen im Vordergrund. Stattdessen dienen diese lediglich als Träger der nicht-physikalischen „Information“. Die Informationstechnik ist aufgrund der Nutzung elektrischer Signale und Komponenten eng mit der Elektrotechnik verknüpft und kann nach [ZIRKLER 2010, S.24] wie diese der Informationsverarbeitung im

Grundsystem zugeordnet werden. Die Abgrenzung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit analog zu [ZIRKLER 2010] über den Übergang von analoger zu digitaler Signalverarbeitung. Somit werden sämtliche Funktionen, die mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung realisiert werden, der Informationstechnik zugeordnet. Dies umfasst zum Betrieb des Systems erforderliche Software sowie zugehörige programmierbare Hardware und nicht-programmierbare Logikbausteine, sofern nicht deren physikalische Eigenschaften sondern die Funktionalität in Form von arithmetischen und logischen Operationen im Vordergrund steht.

Aufgrund der engen Kopplung beider Disziplinen auf der physikalischen Ebene ist der Übergang von der informationstechnischen zur elektrotechnischen Domäne auf der Hardwareseite fließend. Die Software hingegen lässt sich eindeutig der Informationstechnik zuordnen, auch wenn z. B. bei der Programmierung von Mikrocontrollern deren Hardwarefunktionalitäten und -eigenschaften berücksichtigt werden müssen.

### **Regelungs- und Steuerungstechnik**

Neben den drei bisher betrachteten Disziplinen und entgegen der zu Beginn des Kapitels vorgestellten Definitionen, wird die Regelungstechnik ebenfalls von einigen Autoren als eine eigenständige Domäne der Mechatronik angesehen (siehe z. B. [LIPPOLD 2001, S.10; GAUSEMEIER et al. 2001, S.33]).

Aufgabe der Regelungstechnik ist, das Verhalten eines Systems gezielt und in gewünschter Weise durch den Einsatz geeigneter Strategien zu beeinflussen [MICHELS 2006, S.35]. Hierzu werden aus den relevanten Zustandsgrößen des Systems sowie der Führungsgröße über einen Regelalgorithmus die erforderlichen Stellgrößen abgeleitet. Die Beeinflussung des Systemverhaltens erfolgt über die Aktoren (Stellglieder), welche entsprechend der Stellgrößen auf das System einwirken [FÖLLINGER 1994, S.3F]. Das Kennzeichen einer Regelung ist die andauernde Messung der Regelgröße und deren Vergleich mit dem Sollwert der Führungsgröße. Unter Berücksichtigung des Vergleichsergebnisses wird die Regelgröße so beeinflusst, dass sie sich der Führungsgröße angleicht [LUTZ & WENDT 1998]. Neben den sich daraus ergebenden geschlossenen Regelkreisstrukturen können in mechatronischen Systemen ebenfalls offene Steuerketten vorhanden sein, bei denen keine Rückführung des Istwertes erfolgt.

Die Domäne der Regelungs- und Steuerungstechnik ist den übrigen Domänen in gewisser Weise überlagert, da die Struktur des mechatronischen Systems (Verknüpfung von mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Teilsystemen) berücksichtigt werden muss, um dessen Verhalten in der gewünschten Weise zu beeinflussen. Die verwendeten Regelungen und Steuerungen liegen dabei zunächst in Form von mathematischen Modellen vor, die zur Ermittlung der Stellsignale aus den vorhandenen Informationen dienen.

Die technische Realisierung der regelungs- und steuerungstechnischen Funktionen erfolgt in einer oder mehreren der übrigen Domänen, mit deren Hilfe die mathematischen Funktionen und Algorithmen der Regelung abgebildet werden können. Aufgrund des stark informationsverarbeitenden Charakters der Aufgabe bieten sich hierfür die informationstechnische sowie die elektrotechnische Domäne an. Entsprechend häufig erfolgt die Umsetzung der Regelung und Steuerung unter Nutzung dieser Disziplinen. BUUR weist darauf hin, dass unter es bestimmten Randbedingungen sinnvoll sein kann, die erforderlichen Funktionen vollständig innerhalb der mechanischen Domäne zu realisieren, da hierdurch die Energie- und Signalwand-



lung zwischen der Mechanik und der Elektronik entfällt und keine elektrische Hilfsenergie bereitgestellt werden muss [BUUR 1990, S.81f]. Beispiele hierfür sind Druck- und Volumenstromregler in hydraulischen Systemen.

Die einzelnen Domänen mechatronischer Systeme stellen nach JANSEN Wissensgebiete dar, die im Rahmen des mechatronischen Entwicklungsprozesses zusammengeführt werden und an Planung, Konzeption, Entwurf und Realisierung des Gesamtsystems beteiligt sind [JANSEN 2007, S.26]. Die Domänen Mechanik, Elektrotechnik sowie Informationstechnik spiegeln sich weiterhin in den realen Komponenten des Systems sowie deren Verknüpfung und Baustruktur wieder. Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Domänen sowie eine Abgrenzung in Anlehnung an die Grundstruktur des Systems ist in Bild 3-4 dargestellt.

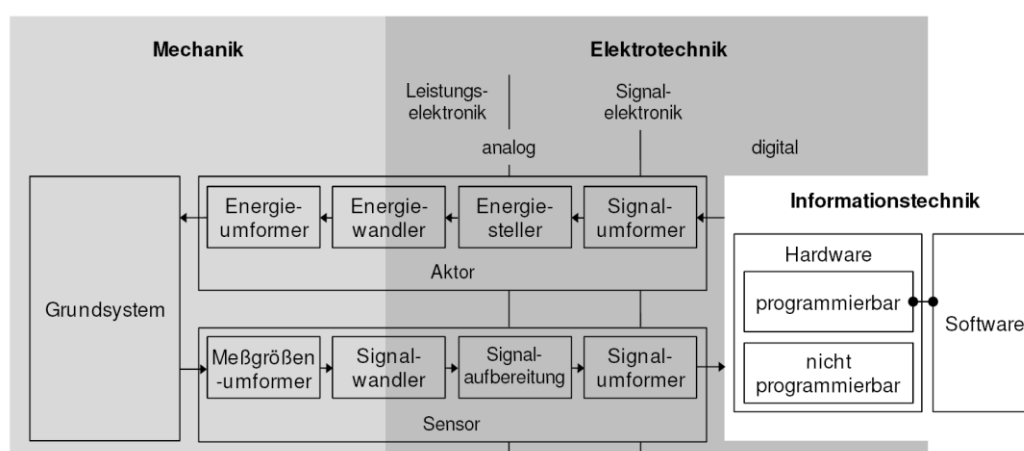


Bild 3-4: Zusammenwirken der Domänen im mechatronischen System [ZIRKLER 2010, S.26 nach JANSEN 2007]

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die Elektrotechnik die Schnittstelle bzw. den Übergang zwischen der Mechanik (analog) und der Informationstechnik (digital) bildet. Der Übergang von Mechanik zur Elektrotechnik erfolgt dabei über die verwendeten Sensoren und Aktoren, wobei hingegen der Übergang von der Elektrotechnik zur Informationstechnik fließend ist (vgl. Domäne Informationstechnik) [ZIRKLER 2010, S.25].

### 3.1.4 Unterstützung der Produktentwicklung mechatronischer Produkte

Zum Abschluss des vorherigen Kapitels wurde dargelegt, wie die unterschiedlichen Domänen in mechatronische Produkten zusammenwirkten und dass eine Integration in einen Entwicklungsprozess erforderlich ist. Daraus leitet sich der transdisziplinäre Charakter mechatronischer Entwicklungsprozesse ab. Im Folgenden werden grundsätzliche Überlegungen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme sowie speziell auf die Entwicklung mechatronischer Systeme ausgerichtete Ansätze dargestellt.

Unter einem **Produkerstellungsprozess** ist nach EHRENSPIEL der gesamte Prozess<sup>21</sup> zu verstehen, der abläuft, bis ein Produkt genutzt werden kann: von der Ideensuche bis zur Auslieferung an den Nutzer [EHRENSPIEL 2006, S.1]. Der vollständige Produkterstellungsprozess kann in die drei übergeordneten Zyklen strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung unterteilt werden [GAUSEMEIER et al. 2009b]. Die **Produktentwicklung** ist der Vorgang, den ein Produkt von der ersten Idee bis zum Fertigungsbeginn durchläuft [EHRENSPIEL 2006, S.1]. Konkreter definiert LINCKE den **Produktentwicklungsprozess** als „*Summe aller operativen und steuernden Aktivitäten die – beginnend mit der ersten Produktidee bis zum Auslauf – die Eigenschaften, Kosten und Erträge, Marketing, Vertrieb und Kundendienst des Produktes festlegen und sicherstellen*“ [LINCKE 1995, S.14].

Zur Beherrschung der vielfältigen Herausforderungen während der Produkterstellung, insbesondere in der Mechatronik (vgl. Kap. 2), wird ein strukturiertes, systematisches und zielgerichtetes Vorgehen in der Produktentwicklung zur Erreichung eines qualitativ hochwertigen Ergebnisses von einer Vielzahl von Autoren gefordert (vgl. z. B. [LINDEMANN 2009, EHRENSPIEL 2006; PAHL et al. 2007; ULRICH & EPPINGER 2003; OTTO & WOOD 2001]). Unter einem **systematischen Vorgehen** ist nach PONN die Wahl geeigneter Aktivitäten in Abhängigkeit der vorherrschenden Rahmenbedingungen (**Entwicklungssituation**) zu verstehen [PONN 2007, S.7].

In umfangreichen technischen Entwicklungen ist zumeist eine große Anzahl Bearbeiter eingebunden, wodurch entsprechende Koordination der Aktivitäten erforderlich ist. Aufgrund der begrenzten kognitiven Fähigkeiten der Individuen und Gruppen sowie zur Beherrschung der Komplexität, werden die Entwicklungsabläufe in einzelne, logisch abgrenzbare Abschnitte unterteilt, die wiederum in handhabbare Arbeitspakete zerlegt werden und eine schrittweise Produktkonkretisierung erlauben [LINDEMANN 2009, S.33]. Als Hilfsmittel hierfür existieren **Vorgehensmodelle**, die ein Vorgehen im Sinne einer deskriptiven Beschreibung oder einer präskriptiven Vorgabe von Arbeitsschritten aufzeigen [PONN 2007, S.7]. Sie können nach HABERFELLNER ET AL. in Abhängigkeit ihres Zeithorizontes sowie des Detaillierungsgrades in **Mikrologik** und **Makrologik** unterteilt werden [HABERFELLNER et al. 2012], wobei die Grenzen zwischen den Stufen nicht eindeutig sind [LINDEMANN 2009, S.38F]. PONN unterscheidet zwischen Vorgehensmodellen auf Ebene elementarer Denk- und Handlungsabläufe (Mikrologik), die tendenziell einen deskriptiven Charakter aufweisen. Daneben existieren Vorgehensmodelle auf Ebene operativer Arbeitsschritte sowie zur Darstellung von größeren Arbeitsabschnitten bzw. Phasen, die eher deskriptiven Charakter besitzen [PONN 2007, S.80FF]. Vorgehensmodelle können als Hilfsmittel zum Planen und Kontrollieren von Prozessen dienen, sowie dem Anwender eine Hilfestellung bieten, welche Schritte als nächstes zu bearbeiten sind. Der Entwickler kann damit sein eigenes Vorgehen reflektieren und seine Handlungen kontrollieren [LINDEMANN 2009, S.33FF; PONN & LINDEMANN 2011, S.14].

Ein weiteres zentrales Hilfsmittel zur Unterstützung der Produktentwicklung stellen **Methoden** dar. Unter einer Methode ist die Beschreibung eines „*regelbasierten und planmäßigen Vorgehens* [zu verstehen], *nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind*“ [LINDEMANN 2009, S.56]. Das Ergebnis einer Methodenanwendung ist zumeist ein oder meh-

---

<sup>21</sup> Zur Definition des Begriffs „Prozess“ siehe Kap. 3.4

rere **Produktmodelle**, worunter die Spezifikation von Produktinformationen als technische Dokumente oder sonstige Repräsentation verstanden wird, die während des Entwicklungsprozesses als (Zwischen-)Ergebnisse erstellt werden [PONN & LINDEMANN 2011, S.18]. Allgemein sind Produktmodelle formale Abbilder realer oder geplanter Produkteigenschaften [GRABOWSKI et al. 1993]. Zur Unterstützung der Methodenanwendung und der Modellerstellung stehen unterschiedliche **Werkzeuge** (Tools) zur Verfügung. Die Bandbreite reicht von einfachen Hilfsmitteln wie Formblättern oder Checklisten, bis hin zu komplexer Software zur Simulation oder Produktstrukturanalyse und -optimierung [PONN & LINDEMANN 2011, S.20]. Unter **Hilfsmitteln** werden nach PONN allgemein sämtliche Möglichkeiten zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses verstanden. Sie stellen somit gleichzeitig den Oberbegriff für Vorgehensmodelle, Methoden und Werkzeuge dar [PONN 2007, S.15].

Es können weiterhin übergeordnete **Strategien** in der Produktentwicklung unterschieden werden, die zur Erreichung langfristiger Ziele dienen. Diesen können unter anderem die „Integrierte Produktentwicklung“, das „Simultaneous/Concurrent Engineering“, „Projektmanagement“ und „Lean Development“ zuordnet werden können [LINDEMANN 2009, S.14; DIEHL 2009, S.48ff].

Einen praxisorientierten Leitfaden zur systematischen, domänenübergreifenden Unterstützung der Produktentwicklung mechatronischer Systeme stellt die VDI Richtlinie **VDI 2206** „Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme“ zur Verfügung [VDI 2004]. Sie ersetzt dabei nicht die etablierten disziplinspezifischen<sup>22</sup> Leitfäden und Vorgehensmodelle, sondern führt diese zusammen [VDI 2004, S.3] und ist daher als Ergänzung zu den Richtlinien VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ [VDI 1993] und VDI 2422 „Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik [VDI/VDE 1994] zu sehen.

Das in der VDI 2206 dargestellte Vorgehensmodell zur Entwicklung mechatronischer Produkte basiert auf Erkenntnissen der industriellen Praxis und der empirischen Konstruktionsforschung und beschreibt ein flexibles Vorgehen, das drei elementare Bestandteile umfasst [VDI 2004, S.26ff]:

- den allgemeinen Problemlösezyklus auf der Mikroebene
- dem V-Modell auf der Makroebene und
- vordefinierten Prozessbausteinen zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte

Der **Problemlösezyklus** der Mikroebene (siehe Bild 3-5 links) basiert auf dem allgemeinen Problemlösezyklus des „Systems Engineering“<sup>23</sup> nach [HABERFELLNER et al. 2012]. Es dient der Strukturierung des Entwicklungsprozesses und kann flexibel an die bestehenden Randbedingungen angepasst werden. Dies ermöglicht die Bearbeitung und Planung vorhersehbarer Aufgaben sowie die Lösung unvermittelt auftauchender Probleme. Zu Beginn steht die Übernahme eines externen Ziels mit anschließender Situationsanalyse bzw. der Analysen einer unklaren Situation mit anschließender Zielableitung. Diese bilden den Ausgangspunkt für die

---

<sup>22</sup> Für eine Beschreibung und Vergleich domänenspezifischer Vorgehensmodelle siehe Kap. 3.1.5

<sup>23</sup> Das Systems Engineering erweitert das Systemdenken der Systemtheorie um Methoden, Werkzeuge, Vorgehensmodellen und Strategien zur anforderungsgerechten Entwicklung sowie dem Management komplexer Systeme. Siehe hierzu Kap. 3.2.3

anschließende Suche nach Lösungen, die im iterativen Wechselspiel von Synthese- und Analyseschritten abläuft. Zielsetzung ist die Erarbeitung alternativer Lösungen, wobei durch den Erkenntnisgewinn neue Aspekte der Aufgabenstellung erkannt werden, die einen Rücksprung zur Anpassung der Situationsanalyse bzw. Zielformulierung erfordern. Im Anschluss werden die erarbeiteten Lösungsalternativen einer detaillierten Analyse und Bewertung unterzogen und deren Eigenschaften mit den gestellten Anforderungen abgeglichen. Den Abschluss bildet die Entscheidung für eine oder mehrere Lösungsalternativen, die als Grundlage für die weitere Planung des Vorgehens dienen. Erfüllt keine der Lösungsalternativen die Anforderungen, muss zur Situationsanalyse bzw. Zielformulierung zurückgesprungen werden.

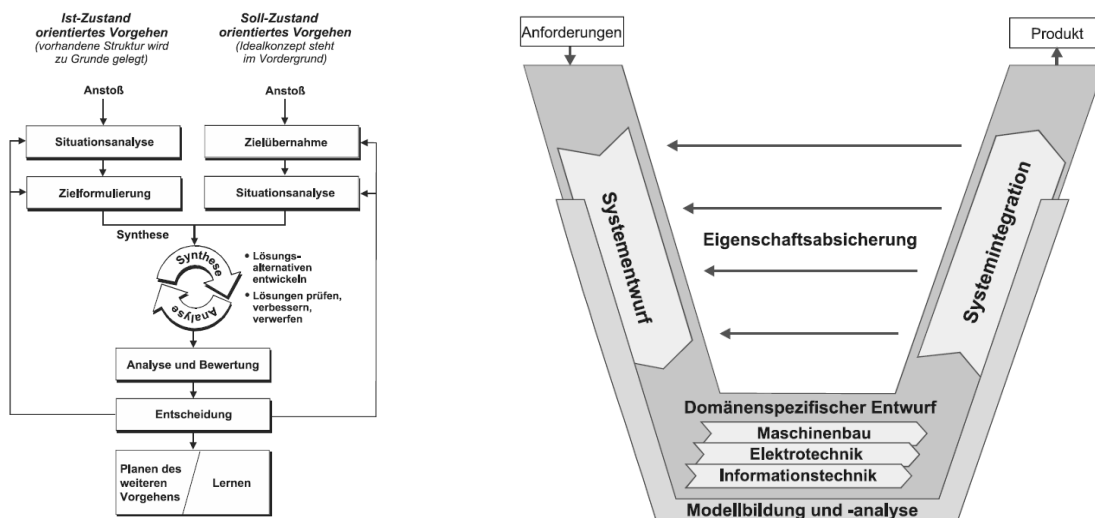


Bild 3-5: Das V-Modell der Entwicklung mechatronischer Systeme als Mikro- und Makrozyklus [VDI 2004]

Im **V-Modell** auf Makroebene (Bild 3-5 rechts), welches aus der Softwaretechnik stammt und an die Bedürfnisse der Mechatronik angepasst wurde (vgl. Kap. 3.1.5), wird die logische Abfolge der wesentlichen Teilschritte zur Entwicklung mechatronischer Produkte dargestellt [BRÖHL 1995; FLATH et al. 2000]. Es basiert auf Erfahrungen aus der empirischen Konstruktionsforschung sowie der Industrie und ist problem- bzw. aufgabenspezifisch anzupassen, so dass die zeitliche Abfolge der Teilschritte in der praktischen Anwendung abweichen kann. Das V-Modell beschreibt somit ein generisches, systematisches Vorgehen zum Entwurf mechatronischer Systeme [VDI 2004, S.29FF]. Der Entwicklungsprozess ist in die drei übergeordneten Phasen „domänenübergreifender Systementwurf“, „domänenspezifischer Entwurf“ und „Systemintegration“ untergliedert.

Den Ausgangspunkt der Entwicklung bildet ein konkreter Entwicklungsauftrag, in dem die Zielstellung präzisiert und in Form von **Anforderungen** dokumentiert ist. Diese Anforderungen bilden zugleich die Kriterien zur späteren Bewertung des Produktes.

Im **Systementwurf** werden die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des Produktes in Form eines domänenübergreifenden Lösungskonzeptes<sup>24</sup> festgelegt und spezifiziert. Dazu wird die Gesamtfunktion des Produktes in wesentliche Teilfunktionen zerlegt. Im Anschluss werden diesen Teilfunktionen geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente<sup>25</sup> zugeordnet sowie die Funktionserfüllung im Systemzusammenhang überprüft. In diesem Rahmen wird ebenfalls festgelegt, welche Teilfunktionen in der mechanischen, elektronischen oder informationstechnischen Domäne realisiert werden. Dieser Vorgang zur Festlegung der Domänenstruktur wird von JANSEN als **Partitionierung** bezeichnet und umfasst sowohl funktionale als auch geometrische Aspekte [JANSEN 2007]. Das Ergebnis der Partitionierung hat wesentlichen Einfluss auf die nachfolgenden Entwicklungsprozesse, da unter anderem die Art und Anzahl der Schnittstellen zwischen den Disziplinen festgelegt werden. Das Ergebnis des domänenübergreifenden Systementwurfs ist die prinzipielle Lösung, die den Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung darstellt.

In der Phase des **domänenspezifischen Entwurfs** erfolgt die weitere Konkretisierung des Systems. In dieser Phase werden detaillierte Auslegungen und Berechnungen zur Sicherstellung der Funktionserfüllung des Gesamtsystems durchgeführt. Die Konkretisierung läuft zu meist getrennt in den einzelnen Disziplinen ab, wobei diese auf ihrer etablierten Begriffswelten, Vorgehensmodelle, Methodiken und Werkzeuge zurückgreifen [vgl. GAUSEMEIER et al. 2001].

In der **Systemintegration** werden die Ergebnisse der verschiedenen Disziplinen zu einer Gesamtlösung zusammengeführt und deren korrektes Zusammenwirken untersucht. Dies erfolgt unter Berücksichtigung von System- und Baustruktur (siehe Kap. 3.2.2) und umfasst sowohl die funktionale und räumliche Integration verteilter Komponenten sowie die **Eigenschaftsabsicherung**, in der fortlaufend die Entwicklungsergebnisse anhand der festgelegten Anforderungen sowie dem Lösungskonzept überprüft werden. Hierdurch soll die Übereinstimmung der Systemeigenschaften mit den geforderten Eigenschaften sichergestellt werden.

Parallel findet über alle Phasen eine **Modellbildung und -analyse** statt, in der die Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnergestützten Werkzeugen simuliert und untersucht werden. Das Ergebnis eines Makrozyklus ist ein **Produkt**, das nicht zwangsweise das reale Endprodukt darstellt. Die Produktkonkretisierung (Zunahme der Reife, siehe Kap. 3.4.1) findet nicht wie dargestellt linear statt. Stattdessen läuft der Entwicklungsprozess iterativ ab (vgl. Kap.3.4.2), wobei die Iterationen sowohl innerhalb der einzelnen Phasen also auch über den gesamten Makrozyklus auftreten können.

Aufgrund des iterativen Charakters können wiederkehrende Tätigkeiten in Form von teilweise vordefinierten **Prozessbausteinen** beschrieben werden [VDI 2004, S.32FF]. In der VDI 2206

---

<sup>24</sup> Ein Lösungskonzept, ist eine aus mehreren Lösungsalternativen ausgewählte prinzipielle Lösung eines Produktes, die die wichtigsten Anforderungen, insbesondere Funktionsanforderungen, am wahrscheinlichsten und optimal erfüllt [EHRENSPIEL 2006]. Alternativ werden auch die Bezeichnungen „prinzipielle Lösung“ oder „Lösungsprinzip“ verwendet [vgl. PAHL et al. 2007].

<sup>25</sup> Lösungsprinzip bezeichnet eine prinzipielle Lösungsmöglichkeit, welche die für die Erfüllung einer Funktion erforderlichen Effekte in Kombination mit den geometrischen und stofflichen Merkmalen umfasst, die das Prinzip der Lösung sichtbar werden lassen [PAHL et al. 2007]. Unter einem Lösungselement ist eine realisierte und bewährte Lösung einer Funktion zu verstehen, wobei es sich meist um ein Modul oder Baugruppe, die auf einem Wirkprinzip beruht, handelt [Gausemeier et al. 2001].

sind Prozessbausteine für die Teilschritte Systementwurf, Modellbildung und -analyse, domänenspezifischer Entwurf, Systemintegration sowie Eigenschaftsabsicherung hinterlegt.

Es existieren in der wissenschaftlichen Literatur eine Vielzahl weiterer Ansätze und Vorgehensmodelle zur Unterstützung der Entwicklung mechatronischer Produkte, beispielsweise BUUR [BUUR 1990], SALMINEN & VERHO [SALMINEN & VERHO 1992], VAN BRUSEL [VAN BRUSSEL 1996], KALLENBACH [KALLENBACH et al. 1997], WALLASCHEK & KÜMMEL [WALLASCHEK & KÜMMEL 1997], LÜCKEL [LÜCKEL et al. 2000], SCHÖN 2000 [SCHÖN 2000], LIPPOLD [LIPPOLD 2001], BUCHENRIEDER (Hardware-Software Codesign) [BUCHENRIEDER 2001], DOHMEN [DOHMEN 2002], FLATH [FLATH 2002], GAUSEMEIER ET AL. [GAUSEMEIER et al. 2005], ISERMANN [ISERMANN 2007] sowie SCHUH ET AL. [SCHUH et al. 2009]. Daneben finden sich Vorgehensmodelle in der industriellen Praxis, die sich an den existierenden Modellen orientieren und entsprechend den jeweiligen Bedürfnissen angepasst wurden. Ein Beispiel ist das an das V-Modell angelehnte Vorgehen zur Mechatronikentwicklung, welches bei Bosch zur Anwendung kommt [BRANDSTETTER et al. 2000; MÖHRINGER 2004, S.32f].

Diese Zusammenstellung soll lediglich einen Überblick der Bandbreite möglicher Unterstützungsansätze geben und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Gemeinsam mit den in Kap. 2.2 hergeleiteten bestehenden Problemen in der Mechatronikentwicklung wird die Aktualität und Relevanz des Themengebiets nochmals unterstrichen. Die genannten Ansätze werden daher nicht im Detail vorgestellt, sondern relevante Aspekte bei Bedarf aufgegriffen. Eine detaillierte Darstellung findet sich beispielsweise bei [MÖHRINGER 2004] sowie [JANSEN 2007].

Es lässt sich festhalten, dass in den bestehenden Ansätzen der disziplinübergreifenden Entwicklung sowie der Vernetzung und Synchronisation der Domänen ein hoher Stellenwert eingeräumt wird. Aus diesem Grund wird zumeist die Phase des domänenübergreifenden Systementwurfs sowie teilweise der Systemintegration (bzw. die entsprechende Äquivalente) detailliert dargestellt und mit entsprechenden Methoden und Werkzeugen unterstützt. Die Phase des domänenspezifischen Entwurfs wird jedoch durchgehend nicht ausreichend adressiert und lediglich auf disziplinspezifische Methoden und Werkzeuge bzw. auf die Verwendung domänenübergreifender Modelle verwiesen. Die Wichtigkeit der Synchronisation der Disziplinen wird genannt, jedoch wird keine durchgehende methodische Unterstützung angeboten.

### 3.1.5 Entwicklungsvorgehen in den beteiligten Disziplinen

Im Anschluss an die Darstellung domänenübergreifender Vorgehensmodelle werden nachfolgend einige repräsentative disziplinspezifische Vorgehensweisen betrachtet. Diese spielen eine zentrale Rolle in der Phase des domänenspezifischen Entwurfs, der im Rahmen dieser Arbeit im Fokus der Betrachtungen steht.

Ein in der Mechanikentwicklung bzw. im Maschinenbau zentrales und verbreitetes Vorgehensmodell ist in den VDI Richtlinien **VDI 2221** [VDI 1993] und **VDI 2222** [VDI 1997] beschrieben. Der Entwicklungsprozess besteht aus sieben aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten zur Konkretisierung des Produktes, die ausgehend von einer Aufgabe bzw. Problemstellung bearbeitet werden (Bild 3-6). Diese werden in die übergeordneten Phasen „Klären und Präzisieren“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ untergliedert. Jedem Schritt bzw. je-

der Phase sind zentrale Arbeitsergebnisse in Form von Dokumenten oder Produktmodellen zugeordnet. Abhängig vom Ergebnis jedes Arbeitsschrittes wird mit dem nächsten Schritt fortgefahren bzw. ein Rücksprung zu einem früheren Schritt (Iteration) durchgeführt.

Weitere Vorgehensmodelle aus dem Maschinenbau finden sich beispielsweise bei KOLLER [KOLLER 1998], ROTH [ROTH 2000], PAHL ET AL. [PAHL ET AL. 2007], EHRENSPIEL [EHRENSPIEL 2006], ALBERS & MEBOLDT [ALBERS & MEBOLDT 2007] oder PONN & LINDEMANN [PONN & LINDEMANN 2011]. Diese sind der VDI Richtlinie 2221 größtenteils sehr ähnlich bzw. bilden deren Grundlage.

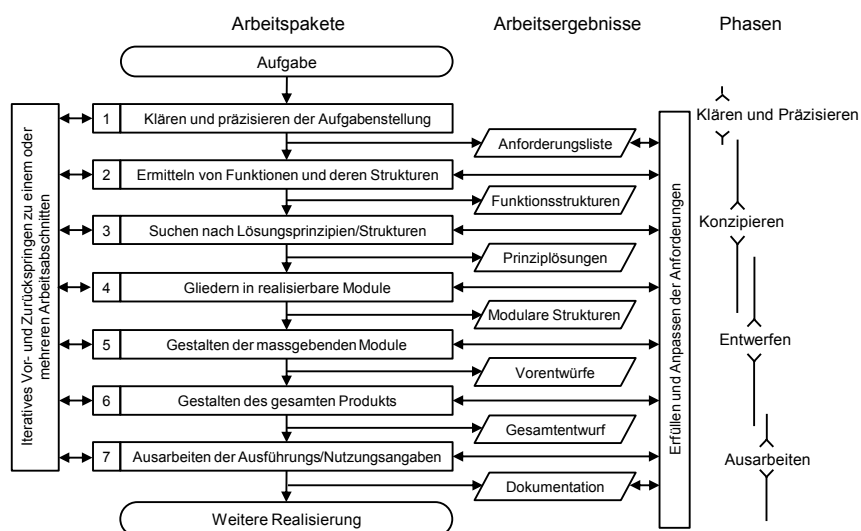


Bild 3-6 Vorgehen in der Mechanikentwicklung nach VDI 2221 [nach VDI 1993]

In der Domäne der Elektrotechnik kann nach [MICHELS 2006] zwischen der Entwicklung analoger und digitaler Schaltungen unterschieden werden. Für den Entwurf analoger Schaltungen wird nach dieser Quelle auf bewährte Lösungen in Form von diskreten Bauelementen oder integrierten Schaltkreisen zurückgegriffen, die in entsprechenden Lösungskatalogen dokumentiert sind. Die Entwicklung von Digitalelektronik ist hingegen deutlich komplexer und ähnelt nach MÖHRINGER dem Vorgehen im Maschinenbau, wobei es stärker formalisiert und zum Teil automatisiert ist [MÖHRINGER 2004, S.31]. Zur Strukturierung des Vorgehens kann das **Y-Diagramm** nach [WALKER & THOMAS 1985] verwendet werden. Der Entwicklungsprozess wird dabei über unterschiedliche Sichten (Verhalten, Struktur und Gestalt) sowie auf fünf Abstraktionsebenen dargestellt (siehe Bild 3-7). In der Verhaltenssicht werden die Funktion des Entwicklungsobjektes sowie seiner Komponenten beschrieben. Die Struktur beschreibt dessen Aufbau, der sich aus der Verkettung mehrerer untergeordneter Komponenten ergibt. In der Gestalt wird die zwei- bzw. dreidimensionale Anordnung der Komponenten festgelegt [BLECK et al. 1996, S.30F]. Die Abstraktionsebenen bilden den Konkretisierungsgrad des Produktes ab. Die äußere Systemebene stellt den höchsten Abstraktionsgrad dar, die Schaltkreisebene repräsentiert entsprechend den höchsten Konkretisierungsgrad.

Das Modell kann abhängig von den Randbedingungen sowohl Bottom-Up (von außen nach innen) als auch Top-Down durchlaufen werden, wobei auch Sprünge und Iterationen zwi-

schen den einzelnen Ebenen und Sichten möglich sind [REIFSCHNEIDER 1998, S.39ff]. Der Entwurf mikroelektronischer Schaltungen kann somit nach obiger Quelle als eine Verkettung von Transformationen (Wechsel der Sichtweise auf einer Abstraktionsebene) und Verfeinerungen (Wechsel der Abstraktionsebene) angesehen werden. Das Y-Diagramm stellt eine rein technologische Sicht auf den Entwurf dar, es wird kein bestimmter Ablauf vorgeschlagen oder vorgegeben [REIFSCHNEIDER 1998, S.26; MÖHRINGER 2004].

Weitere Vorgehensmodelle der Elektrotechnik finden sich bei HEINZL [HEINZL 1985], Armstrong & Gray [ARMSTRONG & GRAY 1993], ESCHERMANN [ESCHERMANN 1993], WHITNEY [WHITNEY 1996] sowie CHANG [CHANG et al. 1997].

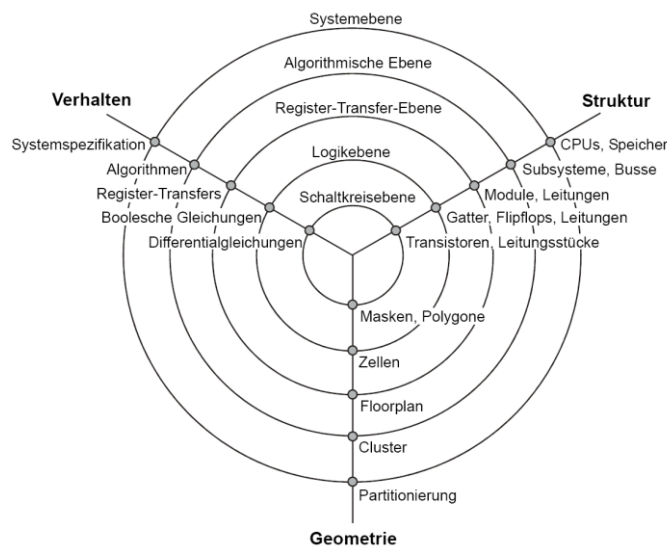


Bild 3-7: Y-Diagramm zum Entwurf digitaler mikroelektronischer Schaltungen nach [REIFSCHNEIDER 1998]

Ein Vorgehensmodell aus der Domäne der Informationstechnik bzw. Softwareentwicklung ist das **Spiralmodell** [BOEHM 1988] (siehe Bild 3-8). Es stellt ein Vorgehen zur systematischen Entwicklung von Software unter vor allem unter Risiko- und Wirtschaftlichkeitsaspekten zur Verfügung. Das Spiralmodell stellt eine Weiterentwicklung des Wasserfallmodells [BOEHM 1981] dar und soll einige von dessen Nachteile überwinden (siehe unten). Der Entwicklungsprozess ist in vier grundlegende Phasen mit bestimmten Aufgaben (Bestimmung von Zielen, Alternativen und Randbedingungen; Bewertung von Alternativen; Entwicklung und Verifikation; Planung der nächsten Phase) unterteilt. Diese übergeordneten Phasen werden mehrfach spiralförmig mit zunehmendem Konkretisierungsgrad des Produktes durchlaufen, wobei am Ende jeder Phase ein Prototyp steht. Der letzte Prototyp entspricht somit dem fertigen Endprodukt. Entsprechend der hohen Risikoorientierung findet am Ende jeder Phase eine entsprechende Risikoanalyse und -bewertung statt. Im Gegensatz zum Wasserfallmodell, in dem nur Iterationen zwischen benachbarten Entwicklungsschritten vorgesehen sind, ermöglicht das Spiralmodell auch Rücksprünge in vorhergehende Phasen. Das Modell eignet sich insbesondere für die Entwicklung von Systemen, deren Anforderungen zu Beginn der Entwicklung nicht vollständig bekannt sind [BALZERT 2000, S.133; KALLMEYER 1998, S.51f].



Als weitere Vorgehensmodelle aus dem Bereich der Softwareentwicklung seien das V-Modell [VERSTEEGEN 2000], das V-Modell XT [HÖHN & HÖPPNER 2008] sowie der objektorientierte Softwareentwurf [KRUCHTEN 2004; BOOCH et al. 2007] genannt.

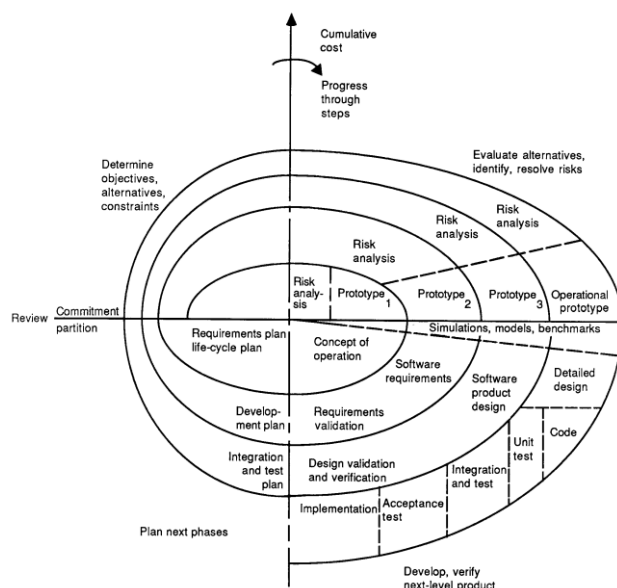


Bild 3-8: Spiralmodell zur Softwareentwicklung [nach BOEHM 1988]

Dieser kurze Überblick von Vorgehensmodellen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Er soll stattdessen noch einmal die bereits mehrfach angesprochene Heterogenität der Vorgehensweisen und Begriffe in den verschiedenen Domänen unterstreichen und präzisieren.

Eine vollständige Vereinigung der einzelnen Modelle ist wie ebenfalls bereits dargestellt nach [MÖHRINGER 2004] nicht bzw. nur auf Makroebene möglich und sinnvoll. Stattdessen müssen die unterschiedlichen disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse in einem gemeinsamen Prozess integriert sowie effektiv und effizient aufeinander abgestimmt (synchronisiert) werden. Ausführlichere Betrachtungen sowie der Vergleich von Vorgehensmodellen finden sich bei [KALLMEYER 1998; MÖHRINGER 2004; DIEHL 2009] sowie speziell zwischen Digitalelektronik- und Mechanikentwicklung bei [WHITNEY 1996; ANTONSSON 1997].

## 3.2 Grundlagen des Systemdenkens und des Systems Engineering

An verschiedenen Stellen dieser Arbeit wurde bereits vom mechatronischen System bzw. dem System aus Produkt und Prozess gesprochen. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff System auf unterschiedliche Objekte angewandt, beispielsweise wird in der Fahrzeugtechnik von vernetzten Systemen (Fahrregelung, Motorsteuerung, Navigation, Entertainment, etc.) gesprochen (siehe Bild 3-9). Auf das zugrundeliegende Denken in Systemen wird im Folgenden eingegangen sowie die erforderlichen Begriffe definiert. Weiterhin wird das verwendete Systemverständnis vorgestellt sowie grundlegende Modelle zur Beschreibung von Produktstrukturen mechatronischer Systeme dargestellt. Die Modellierung von Prozessen wird in Kap. 3.4.3 behandelt.

Das Verständnis und die Durchdringung komplexer Systeme ist ebenfalls eine wesentliche Herausforderung des Systems Engineering [ROPOHL 1975, S.5; PATZAK 1982, S.13; EHRENSPIEL 2006, S.19F]. Das Systems Engineering sowie die damit verbundenen Vorgehensweisen und Modelle gewinnen zunehmend auch im Rahmen der Produktentwicklung an Bedeutung, da es einen Ansatz zum Umgang mit komplexen Systemen bereitstellt. Daher werden die Grundlagen des Systems Engineering dargestellt sowie Verbindungen zur integrierten Produktentwicklung betrachtet.

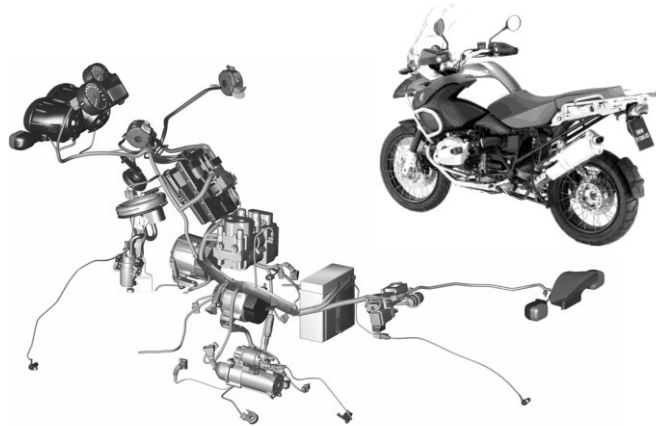


Bild 3-9: Vernetzte Systeme am Beispiel eines Motorrades (mit freundlicher Genehmigung der BMW Group)

### 3.2.1 Systemdenken in der Produktentwicklung

Allgemein wird unter Systemdenken eine „*Denkweise verstanden, die es ermöglicht, komplexe Erscheinungen (= Systeme) besser verstehen und gestalten zu können*“ [HABERFELLNER et al. 2012, S.33]. Diese Denk- und Sichtweise kann somit auf jede beliebige Erscheinung übertragen werden. Nach ROPOHL handelt es sich bei jeder Systemvorstellung um ein **Modell**<sup>26</sup>, das durch menschliches Denken erstellt wurde und an beliebige Gegenstände herangetragen werden kann [ROPOHL 1975, S.25]. Ein grundlegendes Verständnis sowie eine allgemeine Definition von **System** begründen sich aus der Allgemeinen Systemtheorie (General Systems Theory) nach VON BERTALANFFY: *“A system can be defined as a complex of interacting elements. Interaction means that the elements stand in a certain relation”* [VON BERTALANFFY 1950, S.143].

Dieses grundlegende Verständnis eines Systems bestehend aus Elementen und Relationen findet sich in vielen gängigen Definitionen und wurde später für unterschiedliche Anwendungsgebiete durch weitere Aspekte ergänzt bzw. detailliert. Eine aktuelle Definition aus der integrierten Produktentwicklung findet sich bei [EHRENSPIEL 2006, S.20]: *„Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch*

<sup>26</sup> Ein Modell ist ein Gegenüber einem Original zweckorientiert vereinfachtes, gedankliches oder stoffliches Gebilde, das Analogien zu diesem Original aufweist und so bestimmte Rückschlüsse auf das Original zulässt [LINDEMANN 2009, S.333].

*Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System). Die Funktion eines Systems kann durch den Unterschied der dem Zweck entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Nach ihrem Verhalten können statische und dynamische Systeme unterschieden werden“.*

Die Abgrenzung eines Systems durch eine Systemgrenze kann beliebig bzw. in Abhängigkeit der Problemstellung vorgenommen werden. Charakteristisch ist hierbei meist ein größeres (bzw. subjektiv größer wahrgenommenes) Maß an Abhängigkeiten innerhalb des Systems als mit der Umgebung [HABERFELLNER et al. 2012, S.35]. Ein weiterer Aspekt ist, dass die einzelnen Elemente ebenfalls als eigene Systeme (Teil-, Unter- oder Subsystem) betrachtet werden können (vgl. auch [ROPOHL 2009, S.77; STEINMEIER 1999, S.14]. Im Fall eines Elementes aus der Umgebung wird dieses als Umsystem bezeichnet [HABERFELLNER et al. 2012, S.34]. Ferner besitzen die Elemente unterschiedliche Eigenschaften und stehen sowohl Untereinander sowie mit der Umgebung in Beziehung. Diese Beziehungen können beispielsweise die Flussarten nach [PAHL et al. 2007] sein (vgl. Kap. 3.1.2), grundsätzlich ist jede Art von Relation möglich. Weiterhin wird der Zweck (Funktion) eines Systems adressiert, weshalb es ein bestimmtes Verhalten sowie eine Dynamik aufweist.

Eine ähnliche Definition des Systembegriffs gibt KREIMEYER, die er im Rahmen der strukturellen Analyse von Produktentwicklungsprozessen verwendet. Er greift dabei den bei MAURER genannten Aspekt auf, dass das Verhalten eines Systems von dessen Struktur bestimmt wird [MAURER 2007, S.17]. KREIMEYER betont den engen Zusammenhang zwischen Systemzweck, dem Verhalten sowie der Anordnung der Elemente und Relationen: *“A system is a set of entities of (possibly) different types that are related to each other via various kinds of relations. The system is delimited by a system border, across which inputs and outputs of the system are possible as an interaction with the environment. The system fulfills a purpose, which guides the meaningful arrangement of entities and relations. The behavior of the system is, in turn, due to the arrangement of the system’s elements“* [KREIMEYER 2010, S.40]. Dieses Systemverständnis wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegt.

Im Umgang mit Systemen können unterschiedliche Blickwinkel auf ein einzelnes System eingenommen werden, die jeweils bestimmte Eigenschaften der Elemente und Relationen hervorheben. Diese unterschiedlichen Sichtweisen werden auch als Aspekte des Systems bezeichnet und dürfen nicht als absolute Beschreibungen verstanden werden [HABERFELLNER et al. 2012, S.39F]. So betont ROPOHL, dass der allgemeine Systembegriff gleichzeitig drei Konzepte umfasst: Ein System weist Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) auf (**funktionales Konzept**), es besteht aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen (**struktureles Konzept**) und diese werden von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt (**hierarchisches Konzept**) [ROPOHL 2009, S.75F]. Bei der Modellierung und Analyse von Systemen können dementsprechend unterschiedliche Denk- und Vorgehensmodelle zur Anwendung kommen und zwischen wirkungsorientierter, strukturorientierter und umfeldorientierter Betrachtung unterschieden werden [HABERFELLNER et al. 2012, S.41F; RIEPE 2003, S.28]. In der **wirkungsorientierten** Betrachtung wird das System als „Black-Box“ aufgefasst und der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen betrachtet. Im Mittelpunkt steht somit die Beschreibung des Zwecks bzw. der Funktion eines

Systems. Die **strukturorientierte** Betrachtung fokussiert die Elemente und Beziehungen innerhalb des Systems. Hierbei sind vor allem dynamische Wirkmechanismen und Abläufe von Interesse. Zielsetzung ist die Erklärung des Systemverhaltens aus der Anordnung und dem dynamischem Zusammenwirken der Elemente. In der **umfeldorientierten** Betrachtung wird das System ebenfalls als Black-Box aufgefasst und die Zusammenhänge bzw. Einflüsse von und auf die Umgebung betrachtet. Das systemhierarchische Denken kann im Umgang mit komplexen Sachverhalten zur schrittweisen Konkretisierung bzw. Abstrahierung des Systems genutzt werden und so zur Verbesserung des Systemverständnisses beitragen. Es findet sich daher auch im Vorgehensprinzip „Vom Groben ins Detail“ aus dem Systems Engineering wieder [HABERFELLNER et al. 2012, S.58F]. Die zentralen Grundbegriffe des Systemdenkens sowie unterschiedliche Sichten auf Systeme sind in Bild 3-10 grafisch dargestellt.

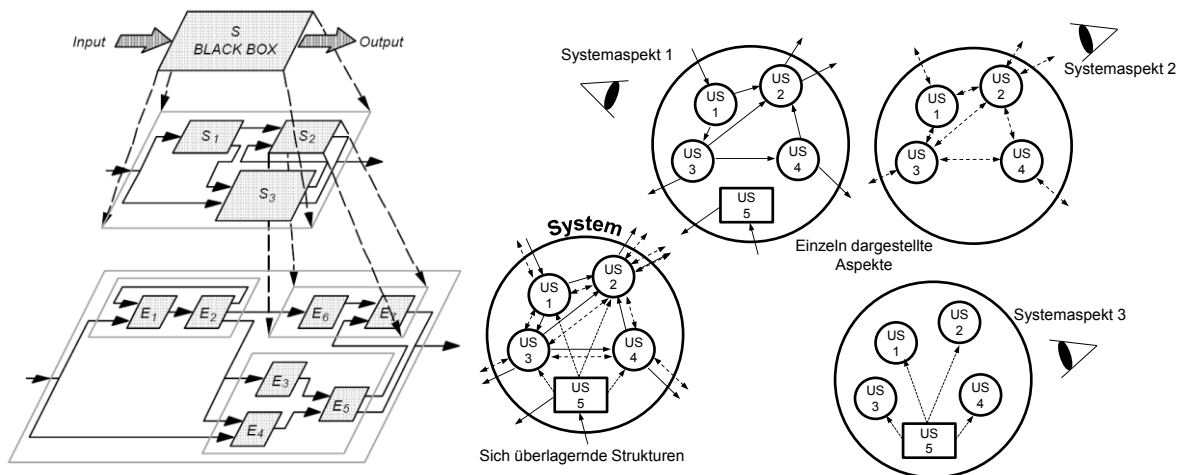


Bild 3-10: Grundbegriffe des Denkens in Systemen [EHRENSPIEL 2006, S.22; HABERFELLNER et al. 2012, S.39]

Aus den dargestellten Systembetrachtungen ist ersichtlich, dass die **Struktur** des Systems einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten hat. Unter der Systemstruktur wird allgemein das Gefüge bzw. die innere Ordnung der Elemente und Beziehungen des Systems verstanden [HABERFELLNER et al. 2012, S.35]. In dieser Arbeit wird die Definition nach MAURER verwendet, die auch auf Ansätze zur Analyse von Systemstrukturen eingeht: *Structure is understood as the network formed by dependencies between system elements and represents the basic attributes of each system. Structures can be characterized by the specific compilation of implied linkages between system elements and can be divided into subsets. Structures and their subsets can be analyzed by means of computational approaches, primarily provided by the graph theory* [MAURER 2007, S.32]. Hierbei können unterschiedliche Strukturformen wie Sternstrukturen, Netzwerkstrukturen, Strukturen mit Rückkopplungen, geschichtete Strukturen oder hierarchische Strukturen auftreten [HABERFELLNER et al. 2012, S.35; PATZAK 1982, S.39FF; BRUNS 1991, S.49FF]. Auf die Anwendung der Graphentheorie zur Systemanalyse wird in Kap. 3.3.3 eingegangen.

Eine konsequente Erweiterung des hierarchischen Aspektes von Systemen ist die Betrachtung von Systemen, deren Elemente wiederum selbst Systeme darstellen. Hierfür wird häufig die

aus dem Systems Engineering stammende Bezeichnung “**System-of-Systems**“ (SoS) verwendet. Eine konsequente Abgrenzung zum allgemeinen Systembegriff existiert nicht, er wird jedoch meist wie folgt aufgefasst [HABERFELLNER et al. 2012, S.35]: Die einzelnen Systeme sind nicht von dem übergeordneten System abhängig, werden primär unabhängig voneinander entwickelt, haben ihren eigenen Nutzen und können auch getrennt betrieben werden. Eine allgemeine Definition findet sich beim US Department of Defense (DOD): “*An SoS is defined as a set or arrangement of systems that results when independent and useful systems are integrated into a larger system that delivers unique capabilities*” [DOD 2008, S.4]. Die einzelnen Systeme eines System-of-Systems können unterschiedlich stark miteinander verbunden sein und müssen dabei keine zentrale Organisation aufweisen [KOSSIAKOFF et al. 2011, S.51]. Ein Auto stellt nach diesem Verständnis kein SoS dar, da die einzelnen Teilsysteme nur im Verbund miteinander ihren Zweck erfüllen. Das Verkehrssystem hingegen kann als SoS betrachtet werden, da es in ein Transportsysteme auf dem Wasser, auf dem Land und in der Luft unterteilt werden kann, die wiederum aus Systemen wie Flugzeugen, Flughäfen oder Schiffen bestehen [HASKINS 2010, S.12]. Eine noch höhere Abstraktionsebene stellen „Enterprises“ dar, in denen mehrere SoS vereint sind. In diese Kategorie fallen beispielsweise Länder, Landkreise oder Städte sowie Regierungen und deren Organisationen [KOSSIAKOFF et al. 2011, S.63]. Für weiterführende Informationen zum Umgang mit Systems-of-Systems sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (z. B. [JAMSHIDI 2009; DOD 2008]).

Der allgemeine Systemgedanke wird in der betriebswissenschaftlichen Systemtheorie auf Unternehmen übertragen, die in diesem Verständnis als komplexe, offene, sozio-technische Systeme zu bezeichnen sind [WIBLER 2006, S.57]. Er kann folglich auch auf die Entwicklung mechatronischer Produkte angewandt werden. In der vorliegenden Arbeit werden mechatronische Produkt (technisches System) wie auch die zugehörigen Entwicklungsprozesse betrachtet. Es handelt sich ebenfalls um ein **offenes, sozio-technisches System** der Produktentwicklung, da die Prozesse bzw. deren Aktivitäten von Menschen ausgeführt werden und somit Bestandteil des betrachteten Systems sind [vgl. EHRENSPIEL 2006, S.23]. Dieses System kann wiederum nach unterschiedlichen Aspekten in **Zielsystem** (Zielvorgaben und deren Verknüpfung), **Objektsystem** (technisches Produkt und dessen Struktur), **Prozesssystem** (Ablauforganisation mit Teilprozessen und Ereignissen) sowie **Handlungssystem** (Aufbauorganisation mit Organisationseinheiten oder Betriebsmitteln) untergliedert werden [EHRENSPIEL 2006, S.23FF; KLEEDÖRFER 1999, S.59FF]. Diese Systeme weisen vielfältige Abhängigkeiten auf und beeinflussen sich gegenseitig, da beispielsweise eine Änderung am Produkt (Objekt) bestimmte Aktivitäten (Prozess) auslösen kann, die wiederum das Produkt beeinflussen. In dieser Arbeit werden insbesondere die Verknüpfung von Objekt- und Prozesssystem betrachtet. Ziel- und Handlungssystem spielen bei der Darstellung der Produktreife sowie bei der Ableitung von Teamstrukturen eine Rolle.

### 3.2.2 Modellierung von Produktstrukturen

In der Produktentwicklung werden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung von Produktstrukturen verwendet, die jeweils bestimmte Aspekte des Systems fokussieren (vgl. Kap. 3.2.1). Nach GRABOWSKI sind Produktmodelle formale Abbilder realer oder geplanter Produkteigenschaften [GRABOWSKI et al. 1993]. Zur Modellierung technischer Produkte im

Rahmen der Lösungssuche kommen häufig Funktions-, Wirk- und Baustrukturen zur Anwendung [siehe z. B. VDI 1993; VDI 1997; PAHL et al. 2007]. Diese werden auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet und daher im Folgenden näher betrachtet. Auf die Modellierung von Entwicklungsprozessen wird in Kap. 3.4.3 eingegangen.

Bei der Modellierung von Produktstrukturen wird meist zwischen horizontalen und vertikalen Abhängigkeiten unterschieden, die jeweils unterschiedliche Sichten auf das System fokussieren. **Horizontale Abhängigkeiten** repräsentieren Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen auf einer Betrachtungsebene und können verschiedene Abhängigkeiten wie Flussbeziehungen, geometrische und logische Abhängigkeiten beschreiben. Die **vertikalen Abhängigkeiten** drücken die Hierarchie eines Systems aus und repräsentieren meist logische Beziehungen (enthält, besteht aus). GÖPFERT spricht daher auch von hierarchischer Struktur (vertikal) und Beziehungsstruktur (horizontal) [GÖPFERT 1998, S.18FF; STEFFEN 2006, S.14FF]. PULM merkt hierzu an, dass Produktstrukturen grundsätzlich sowohl **hierarchisch**, **flussorientiert** oder **anderweitig vernetzt** aufgebaut sein können [PULM 2004, S.160FF].

In einer **Funktionsstruktur** wird nach PAHL ET AL. die Gesamtfunktion<sup>27</sup> eines Produktes in Teilfunktionen untergliedert, die als Ausgangspunkt für die Lösungssuche dienen [PAHL ET AL. 2007, S.43FF]. Die Bildung der Funkstruktur umfasst sowohl hierarchische (Bildung der Teilfunktionen) sowie logische Aspekte (Vernetzung der Teilfunktionen untereinander). Zur Darstellung der Funktionsstruktur können Funktionsbäume verwendet werden, die die Hierarchie des Systems widerspiegeln [EHRENSPIEL 2006, S.369F]. Die Modellierung horizontaler Relationen kann beispielsweise mittels relationsorientierter, umsatzorientierter oder nutzerorientierter Funktionsmodelle erfolgen [PONN & LINDEMANN 2011, S.65FF]. Die parallele Abbildung beider Aspekte wird von GÖPFERT auch als Systemmodell bezeichnet, das jedoch nur geringe Komplexität zulässt [GÖPFERT 1998, S.94]. Zur besseren Unterscheidung der beiden Aspekte verwendet KALLMEYER die Begriffe Funktionshierarchie und Funktionsstruktur zur Modellierung der Funktionen mechatronischer Produkte [KALLMEYER 1998]. Eine Übersicht von unterschiedlichen Funktionsmodellen findet sich bei [ERDEN et al. 2008].

In der **Komponentenstruktur** wird hingegen der strukturelle Zusammenhang der Komponenten des Produktes abgebildet, die in ihrem Zusammenwirken die Systemfunktion erfüllen. Analog zur Funktionsstruktur können auch hier unterschiedliche Ausprägungen verwendet werden. Eine Ausprägung stellt die **Wirkstruktur** nach PAHL ET AL. dar, die den Wirkzusammenhang der Komponenten auf Basis physikalischer Effekte sowie geometrischer und stofflicher Merkmale beschreibt [PAHL ET AL. 2007, S.49FF]. In einer **Baustruktur** wird hingegen der technisch-physische Zusammenbau der Komponenten (Gliederung in Bauteile und Baugruppen) abgebildet, beispielsweise um Anforderungen von Fertigung, Montage und Transport zu berücksichtigen [GÖPFERT 1998, S.73F; PAHL ET AL. 2007, S.53]. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Betrachtung der Funktionserfüllung der Komponenten. In dieser Ausprägung, von [ZIRKLER 2010, S.42] als **funktionale Komponentenstruktur** bezeichnet, sind zwei Komponenten miteinander verbunden, wenn sie zur Erfüllung der gleichen Funktion beitragen. Die Strukturierung von Komponenten wird auch als Erzeugnisgliederung be-

---

<sup>27</sup> Eine Funktion ist eine am Zweck orientierte, lösungsneutrale, als Operation beschriebene Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems. Funktionen werden durch Kombination eines Substantivs und einem Verb beschrieben [LINDEMANN 2009, S.331].

zeichnet und häufig zur Ableitung von Stücklisten eingesetzt, wobei grundsätzlich beliebige Systemaspekte dargestellt werden können [RIEPE 2003, S.30FF].

Die Betrachtungen zur Funktions- und Komponentenstruktur sind eng mit der **Architektur** eines Produktes verknüpft. Allgemein ist eine Architektur definiert: „*The structure of components, their relationships, and the principles and guidelines governing their design and evolution over time*“ [KOSSIAKOFF et al. 2011, S.223]. Nach ULRICH & EPPINGER wird unter der Architektur eines Produktes die Abbildung von Funktionen auf physische Komponenten sowie deren Interaktion verstanden [ULRICH & EPPINGER 2003]. Sie beschreibt den grundlegenden Aufbau eines Produktes und ist somit durch die Funktions- und Komponentenstruktur sowie Transformationsbeziehungen zwischen beiden definiert [GÖPFERT 1998, S.75]. Bei der Verknüpfung der Funktionen mit Komponenten können n:1, 1:n oder allgemein n:m Beziehungen auftreten [ULRICH 1995, S.421]. Zur Veranschaulichung ist in Bild 3-11 ein Ausschnitt der Produktarchitektur für das Beispiel einer Waschmaschine grafisch dargestellt.

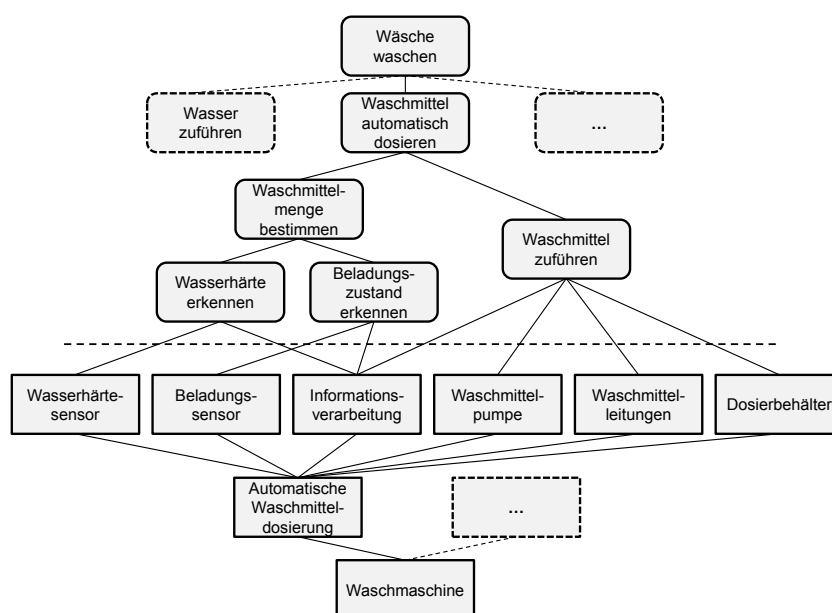


Bild 3-11: Verknüpfung von Funktions- und Komponentenstruktur [in Anlehnung an GÖPFERT 1998, S.98]

Die in der Produktentwicklung häufig verwendeten grafischen Darstellungen von Funktions- und Komponentenstrukturen als Netz bzw. Netzwerk können mathematisch als **Graph** aufgefasst werden. Die Elemente des Systems werden zumeist als **Knoten**, die Relationen als **Kanten** des Graphs modelliert. Wird lediglich die Existenz einer Relation abgebildet (beispielsweise Verknüpfung von Funktionen und Komponenten in Bild 3-11) handelt es sich um einen **ungerichteten Graph**. Für den Fall, dass auch die Richtung der Abhängigkeit modelliert wird (z. B. ein Energie- oder Informationsfluss), liegt ein **gerichteter Graph** vor. Soll zusätzlich die Stärke einer Abhängigkeit dargestellt werden, so kann dies mit Hilfe von **stärkebasierten Graphen** erfolgen. In einem solchen Graph sind die Knoten näher beieinander angeordnet, je stärker die Relation zwischen ihnen ist [LINDEMANN et al. 2008, S.48F].

Es existieren in der Literatur zahlreiche Ansätze und Methoden zur Erstellung, Modellierung und Analyse von Produktstrukturen. Weit verbreitet sind dabei Ansätze, die verschiedene Produktstrukturen in getrennten Modellen abbilden und behandeln [VDI 1997; PAHL et al. 2007; EHRENSPIEL 2006; PONN & LINDEMANN 2011]. Eine direkte Verknüpfung von Funktions- und Komponentenstruktur zeigen [ULRICH 1995] sowie [GÖPFERT 1998]. Im der FBS<sup>28</sup>-Modellierung erfolgt eine Verknüpfung von Funktions-, Verhaltens- und Komponentenstruktur [UMEDA & TOMIYAMA 1995]. Im Bereich der Designtheorien (Theories of Design) findet sich die Verknüpfung unterschiedlicher Aspekte von Produktstrukturen unter anderem im „Axiomatic Design“ nach [SUH 1998] sowie im „Property-Driven Development (PDD)“ nach [WEBER 2005a].

Zur Unterstützung der Entwicklung mechatronischer Systeme finden sich Ansätze, die eine Verknüpfung von unterschiedlichen Produktstrukturen vornehmen, diese jedoch in unterschiedlichen Modellen abbilden (z. B. [GEHRKE 2005; FRANK 2006; STEFFEN 2006; GAUSEMEIER et al. 2009a]). In Weiterentwicklungen wird durch zunehmende Formalisierung der (Partial-)Modelle sowie einer konsequenten Rechnerunterstützung, analog zu Ansätzen des Model-based Systems Engineering (siehe Kap. 3.2.3), eine integrierte Produktmodellierung erreicht (z. B. [ANACKER et al. 2011]). Alternative rechnergestützte Ansätze auf Basis von FBS-Modellen finden sich bei [KOMOTO & TOMIYAMA 2010; VAN BEEK et al. 2010]. Einen objektorientierten Ansatz zeigen [WU et al. 2009]. Ebenso können in SysML<sup>29</sup> durch Verwendung von Allocation und Interaktionsdiagrammen unterschiedliche Systemaspekte in einem integrierten Modell abgebildet werden [OMG 2010]. Die Verknüpfung und konsistent Haltung disziplinspezifischer Modelle in der Phase des domänenspezifischen Entwurfs betrachten [GAUSEMEIER et al. 2009c]. Einen Ansatz zur integrierten Modellierung von Funktions- und Komponentenstruktur sowie die Verknüpfung mit Personen (Prozessdomäne) zeigt [DIEHL 2009]. Dieser basiert auf einer Multiple-Domain Matrix nach [MAURER 2007, S.60FF], die einen generischen Ansatz zur Modellierung und Verknüpfung beliebiger Strukturen darstellt. Die Multiple-Domain Matrix wird Kap. 3.3.2 detailliert behandelt.

### 3.2.3 Systems Engineering und Integrierte Produktentwicklung

Auf Grundlage der allgemeinen Systemtheorie (siehe Kap. 3.2.1) entwickelte sich die **Systemtechnik**, die in der Literatur auch als „**Systems Engineering**“ (SE) bezeichnet wird. Die Ursprünge des Systems Engineering finden sich in den 1940er Jahren, als es in den Bell Labs zur Entwicklung der ersten Telefonsysteme eingesetzt wurde. Es wurde im weiteren Verlauf durch die NASA entscheidend weiterentwickelt und kam im Rahmen des Mondlandeprogramms und zur Entwicklung der Space Shuttles zum Einsatz. Es war dabei von Beginn an als generische Methodik zum Umgang mit interdisziplinären Entwicklungsaufgaben in räumlich und organisatorisch verteilten Entwicklergruppen konzipiert (vgl. [LINDEMANN ET AL. 2010]). Als zentrale Gründe für die Entstehung des Systems Engineering geben [SAGE & ROUSE 2009, S.24FF] die Zunahme von Risiken und Komplexität aufgrund der Fortschritte in der Technik, die daraus resultierende Notwendigkeit zum risikoorientierten Vergleich alternativer Lö-

<sup>28</sup> Function-Behaviour-Structure (FBS)

<sup>29</sup> Systems Modelling Language (SysML)



sungsansätze und Findung von Kompromissen sowie die Zunahme der Bedeutung von Schnittstellen, die sich aus der Spezialisierung der Disziplinen ergibt, an.

### Grundlagen des Systems Engineering

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich eine Vielzahl von Ansätzen und Vorgehensmodellen zum Thema Systems Engineering (z. B. [SAGE & ROUSE 2009; KOSSIAKOFF et al. 2011; HABERFELLNER et al. 2012]). Ebenso gibt es unterschiedliche Organisationen wie NASA<sup>30</sup>, INCOSE<sup>31</sup> oder DoD<sup>32</sup>, die eigene Definitionen und Standards zum Umgang mit komplexen Systemen vorgeben [NASA 2007; HASKINS 2010; DOD 2001]. Diese unterscheiden sich in ihrer konkreten Ausgestaltung im Detail und können zentrale, gemeinsame Grundelemente aufweisen. Allgemein beschreibt PATZAK die Systemtechnik als *„ein Methodengebäude zur Behandlung von Problemen mit hoher Komplexität. Sie befasst sich mit sämtlichen Lebensphasen von Systemen, d.h. mit der Planung, Realisierung einschließlich der Organisation der Nutzung derselben, welche die ihnen zugedachte Funktion voll erfüllen, sich optimal in ihre Umwelt einfügen sowie deren Subsysteme reibungslos zusammenwirken“* [PATZAK 1982, S.15]. Dieses Verständnis findet sich auch in aktuellen Definitionen wieder, wobei eine Erweiterung um wirtschaftlichen Betrachtungen vorgenommen wird: *„Systems engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. It focuses on defining customer needs and required functionality early in the development cycle, documenting requirements, and then proceeding with design synthesis and system validation while considering the complete problem [...]. SE considers both the business and the technical needs of all customers with the goal of providing a quality product that meets the user needs“* [HASKINS 2010, S.7].

Das Grundgerüst des Systems Engineering besteht aus zwei übergeordneten Bereichen, die von [HABERFELLNER ET AL. 2012, S.28F] auch als „Systems Engineering-Philosophie“ bezeichnet werden. Diese umfasst einerseits das **Systemdenken** zur Erfassung und Strukturierung von Phänomenen und Sachverhalten, zum anderen **Vorgehensmodelle** mit Strategien, Prozessen, Methoden und Werkzeugen zur Analyse und Synthese von Systemen. Das Systems Engineering ist dabei als Methodologie des zweckrationalen Handelns auf die praktische Anwendung ausgerichtet [PATZAK 1982, S.2]. Analog dazu beschreiben SAGE & ROUSE drei zentrale Ebenen des Systems Engineering in einem hierarchischen Modell: Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung von Systemen (Produkt oder Leistung), Methodiken zum zielgerichteten Einsatz dieser Methoden über den Lebenszyklus (Prozesse) sowie Ansätze zum Management und zur organisatorischen Integration der Prozesse (Management) [SAGE & ROUSE 2009, S.11]. Das Systemdenken wurde in Kap. 3.2.1 bereits detailliert behandelt, daher wird an dieser Stelle auf SE-Vorgehensmodelle sowie den enthaltenen Methoden und Werkzeuge eingegangen. In den Vorgehensmodellen des Systems Engineering finden sich vier zentrale Grundgedanken bzw. -prinzipien, die [HABERFELLNER ET AL. 2012, S.57FF] wie folgt zusammenfassen: das Vorgehen „Vom Groben zum Detail (Top Down)“, das „Denken in Varianten“, die zeitliche Gliederung der Entwicklung, Realisierung und Nutzung in Projektphasen

---

<sup>30</sup> National Aeronautics and Space Administration (NASA)

<sup>31</sup> International Council on Systems Engineering (INCOSE)

<sup>32</sup> Department of Defense (DoD)

(Makrologik) sowie den Einsatz eines generischen Vorgehensleitfadens zur Problemlösung in allen Phasen (Problemlösezyklus, Mikrologik).

Die *zeitliche Gliederung* unterscheidet sich je nach Ansatz in Anzahl und Benennung der verwendeten Lebenszyklusphasen, dient jedoch in allen Ansätzen zur Zerlegung des Projektes in logisch und zeitlich getrennte Phasen. Hierbei kann zwischen phasenorientierten (phase-driven), agilen, inkrementellen/integrativen sowie „Lean Development“ Ansätzen unterschieden werden [HABERFELLNER ET AL. 2012, S.86FF; HASKINS 2010, S.32FF]. Durch die Zerlegung in überschaubare und handhabbare Abschnitte wird eine Reduzierung der Komplexität erreicht. Die einzelnen Phasen besitzen jeweils definierte Anfangs- und Endpunkte (Entscheidungspunkte, Decision Gates), zu denen bestimmte Aktivitäten abgeschlossen sein müssen, bevor der Übergang in die nächste Phase stattfindet. Diese Punkte dienen neben der Erfassung des aktuellen Projektstatus gleichzeitig zur Synchronisation der einzelnen Teilprozesse und Arbeitspakete, da eine Zusammenführung von Teilergebnisse sowie ein Austausch der Disziplinen erforderlich ist [HABERFELLNER ET AL. 2012, S.73; HASKINS 2010, S.22FF]. Das *Vorgehen zur Problemlösung* lässt sich allgemein in die Phasen Situationsanalyse (Informationsbeschaffung, -aufbereitung, -darstellung), Zielformulierung, Lösungssynthese, Lösungsanalyse sowie Bewertung/Entscheidung untergliedern [WIBLER 2006, S.58], wobei sich auch hier die einzelnen Ansätze in ihrer konkreten Ausgestaltung unterscheiden. Dieses Vorgehen kommt in allen Phasen zum Einsatz und wird jeweils auf die spezifische Problemstellung angepasst. Zur Unterstützung der Problemlösung können ebenfalls unterschiedliche Methoden und Werkzeuge eingesetzt werden. Zur Verdeutlichung ist in Bild 3-12 ein Beispiel für ein Phasenmodell des Lebenszyklus sowie das zugehörige Problemlösemodell dargestellt.

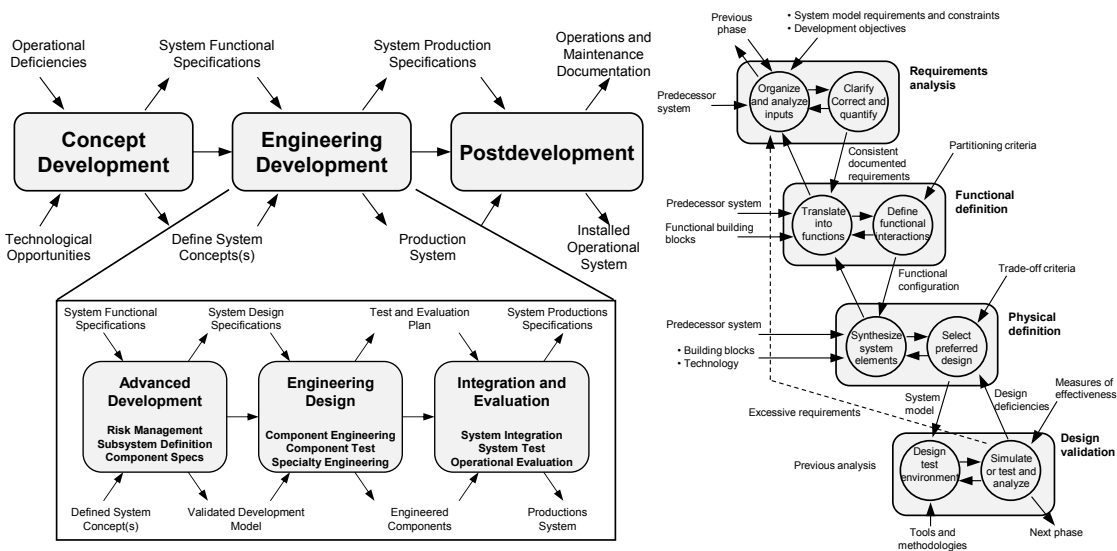


Bild 3-12: Beispiel für ein Lebenszyklusmodell sowie Problemlösezyklus [nach KOSSIAKOFF et al. 2011]

Das dritte von SAGE & ROUSE genannte zentrale Element des Systems Engineering ist das **Management von Systemen**, welches sich mit den organisatorischen Aspekten im Umgang mit komplexen Systemen befasst. Da die Entwicklung von Systemen zumeist in Projekten stattfindet, existieren zahlreiche Schnittstellen und Überschneidungen zum Projektmanage-

ment, bzw. das Systems Engineering wird auch als Teilmenge des Projektmanagements angesehen (vgl. [NASA 2007, S.4; HASKINS 2010, S.175F; KOSSIAKOFF ET AL. 2011, S.111F]). Das Projektmanagement kann nach diesem Verständnis in die Bereiche Systems Engineering (technischer Fokus) sowie Projektplanung und -steuerung (organisatorischer Fokus) untergliedert werden, die sich in bestimmten Bereichen überlappen. Die Schwerpunkte des Systems Engineering liegen dabei auf der Systemarchitektur, technischer Koordination und Systemintegration, während die Projektplanung und -steuerung auf Planung, Ressourcenmanagement sowie Finanz- und Zuliefermanagement fokussiert ist. Überlappende Bereiche sind die Festlegung von Aktivitäten, das Risikomanagement sowie Einbeziehung der Kunden. In Konsequenz kann auf Ebene der Vorgehensmodelle eine Unterteilung in technische und projektbezogene Prozesse vorgenommen werden [HASKINS 2010, S.2; NASA 2007, S.4F]. Die technischen Prozesse dienen dabei zur Koordination der Entwickler, Hersteller, Nutzer und weiterer relevanter Stakeholder, während die projektbezogenen Prozesse sich mit der Erstellung und Anpassung von Plänen, der Erfassung und Kontrolle des Projektfortschritts sowie der Einhaltung von Vereinbarungen befassen [HASKINS 2010]. Ein weiterer Punkt zum Management von Systemen ist das „Tailoring“, welches sich mit Anpassung des Umfangs der technischen und organisatorischen Aktivitäten an die Randbedingungen des Projektes beschäftigt [HASKINS 2010, S.301FF; DOD 2001, S.9; NASA 2007, S.303FF]. Eine detaillierte Betrachtung des Projektmanagements wird in Kap. 3.4.1 vorgenommen.

### **Anwendung von Systems Engineering in der Integrierten Produktentwicklung**

Mit dem *Systems Engineering* und der *Integrierten Produktentwicklung* [ANDREASEN & HEIN 1987; EHRENSPIEL 2006] (im weiteren Sinn auch [PAHL et al. 2007]) existieren zwei grundsätzlich ähnliche Ansätze bzw. Strategien zur Definition, Entwicklung und Handhabung komplexer transdisziplinärer Produkte und Systeme. Vor dem Hintergrund ihres jeweiligen historischen Entstehungskontextes besitzen sie jedoch unterschiedliche Schwerpunkte und Sichten. Es ist somit grundsätzlich im Rahmen der Produktentwicklung erstrebenswert, Synergien zwischen beiden Ansätzen durch gezielte Übertragung spezifischer Elemente nutzbar zu machen. Dies ist grundsätzlich möglich, da sich die verwendeten Methoden und Werkzeuge stark ähneln bzw. teilweise identisch sind (vgl. [MAURER 2007, S.48f]). Zur zielgerichtet Übertragung von Elementen und Nutzung von Synergien ist eine Kenntnis der jeweiligen Schwerpunkte von Bedeutung.

Das **Systems Engineering** (SE) hat, wie bereits beschrieben, seine Ursprünge in der Entwicklung komplexer und räumlich verteilter Systeme. Seine grundlegende Zielsetzung besteht nach PATZAK darin, ein System durch Festlegung seiner Struktur so zu gestalten, dass es seine Funktion bezüglich vorgegebener Ziele erfüllt [PATZAK 1982, S.15]. Konkreter ist SE ein holistischer Ansatz, in dem vor dem Hintergrund unterschiedlicher und sich evtl. widersprechender Randbedingungen Lösungen aus unterschiedlichen Disziplinen zusammengeführt, bewertet und aufeinander abgestimmt werden, um daraus ein sicheres, ausgeglichenes System abzuleiten und zu realisieren, das von keiner Disziplin dominiert wird [NASA 2007, S.3F]. Wesentliche Elemente sind somit die Klärung der Anforderungen (best system), die Abstimmung von Lösungen und Schaffung von Kompromissen (trade-offs, balanced system) sowie die Realisierung eines erfolgreichen und sicheren Systems (successful, safe system) [NASA 2007, S.3F; KOSSIAKOFF ET AL. 2011, S.27FF]. Die Unterschiede zu den „klassischen Ingeni-

eurdisziplinen“ (vgl. Kap. 3.1.2) fassen [KOSSIAKOFF et al. 2011, S.18f] zusammen: Das SE ist auf das System als Ganzes ausgerichtet, es erfasst und berücksichtigt Anforderungen des Kunden sowie den operativen Einsatz, es ist federführend bei der konzeptionellen Gestaltung und schafft eine Brücke zwischen den Disziplinen mit ihren spezifischen Schwerpunkten und Sichtweisen. Darüber hinaus ist es ein integraler Bestandteil des Projektmanagements. In Konsequenz weist das Systems Engineering eine auf Problemlösung ausgerichtete Sichtweise auf, in der die beteiligten Systemingenieure primär Fähigkeiten zur Problemlösung benötigen (Generalisten) statt Spezialisten in einer Disziplin zu sein [PATZAK 1982, S.15]. Anders ausgedrückt verlangt die Sichtweise des SE nach technischer Breite anstelle technischer Tiefe [KOSSIAKOFF et al. 2011, S.32]. Dies wird bei KOSSIAKOFF ET AL. weiterhin dadurch verdeutlicht, dass sie die zentrale Funktion des SE in der „Führung“ (guide) des Entwicklungsprozesses sehen, wobei die Systemingenieure nicht zwangsläufig Teil der Problemlösung sein müssen [KOSSIAKOFF ET AL. 2011, S.3F].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fokussierung der Prozesssicht im Systems Engineering. Die Realisierung der spezifizierten Teillösungen und -systeme nimmt lediglich einen kleinen Teil im SE ein. Eine Unterstützung der technischen Lösungssuche und Ausgestaltung von Komponenten findet nicht statt, es wird lediglich auf die Fähigkeiten in den Disziplinen verwiesen. Zur Unterstützung der Systemingenieure werden in verschiedenen Ansätzen grundlegende Einblicke in spezifische Schwerpunkte und Sichtweisen der Disziplinen gegeben [z. B. HASKINS 2010, S310FF]. Sie sind vergleichbar mit den DfX-Ansätzen<sup>33</sup> und sollen dazu dienen, die unterschiedlichen Vorgehensweisen und Bedürfnisse der Disziplinen im Gesamtsystementwurf zu berücksichtigen.

Zusammenfassend befasst sich das Systems Engineering mit dem Zusammenführen, Bewerten und Abstimmen von organisatorischen und technischen Interaktionen in komplexen Systemen [NASA 2007, S.4]. Die Handlungsschwerpunkte liegen im Anforderungsmanagement, der Entwicklung der Systemarchitektur, der Definition und Zuordnung von Arbeitspaketen, der Abstimmung und Bewertung technischer Entwürfe und Kompromisse, dem Risikomanagement, der Definition und dem Management von Schnittstellen, sowie der Steuerung von Integration, Validierung und Verifikation des Systems [NASA 2007, S.3F; KOSSIAKOFF ET AL. 2011, S.112; HASKINS 2010, S.2]

Die **Integrierte Produktentwicklung** (IPE) hat ihre Ursprünge in der Konstruktionslehre bzw. der Konstruktionsmethodik. Die Grundlage der Konstruktionsmethodik bildet zum einen die Theorie technischer Systeme (Beschreibung technischer Gebilde, Was wird festgelegt?) und zum anderen die Theorie der Konstruktionsprozesse (Wie wird festgelegt?) [vgl. EHRLENSPIEL 2006, S.18]. Aufgrund dieser Ursprünge legt die integrierte Produktentwicklung besonderen Wert auf die Unterstützung der Lösungs- und Gestaltfindung technischer Systeme. Dies umfasst insbesondere die (abstrakte) Modellierung sowie die Lösungssuche, -bewertung und -auswahl. Der Entwickler wird sowohl bei der kreativen und systematischen Lösungssuche sowie dem Denken in Alternativen methodisch unterstützt. Hierzu finden sich eine Vielzahl von Vorgehensmodellen, Methoden und Werkzeugen zur systematischen Unterstützung des Entwurfs technischer Systeme (siehe Kap 3.1.5). Daneben existieren DfX-Ansätze mit

---

<sup>33</sup> Design-for-X (DfX)

Regeln, Richtlinien und Vorschlägen zur Realisierung bestimmter Produkteigenschaften (bspw. fertigungs- oder kostengerecht) sowie Konstruktionskataloge mit vorgefertigten Lösungselementen für spezifische Problemstellungen [ROTH 2000].

In der IPE standen dementsprechend von Beginn an das technische Produkt sowie die Tätigkeiten der einzelnen Konstrukteure im Mittelpunkt der Betrachtungen. Im weiteren Verlauf wurden diese Betrachtungen ausgeweitet, um auch Entwicklergruppen, die vielfältigen Entwicklungsaktivitäten aufgrund der zunehmenden Interdisziplinarität sowie externe und interne Einflüsse auf die Entwicklung und das technische System zu berücksichtigen. Dies geschah als Reaktion auf die zunehmenden Anforderungen an Produkte und Prozesse und somit an die Entwickler. Der Systemgedanke wurde konsequent weiterentwickelt und heute steht integrierte Produktentwicklung für einen holistischen Ansatz, der die Entwicklung optimaler Produkte für den gesamten Lebenszyklus fördert [vgl. LINDEMANN ET AL. 2010]. Analog zum Systems Engineering wird auch in der IPE ein breites technisches Verständnis (Breite) anstelle von spezifischem Fachwissen (Tiefe) benötigt. Jedoch ist diese Tendenz aufgrund der Ursprünge in der Konstruktionsmethodik weniger ausgeprägt.

Trotz der unterschiedlichen Ursprünge überlappen sich SE und IPE, setzen jedoch unterschiedliche Schwerpunkte. Beiden Ansätzen gemein ist beispielsweise die Betonung der transdisziplinären, anforderungsgerechten Entwicklung technischer Systeme über den gesamten Lebenszyklus. Von den beteiligten Akteuren wird ganzheitliches, systemorientiertes Denken und Handeln gefordert, dass mit entsprechenden Methoden, Modellen und Werkzeugen unterstützt wird. Die IPE kann dabei aus systemtechnischer Perspektive als „Bottom-Up“-Ansatz aufgefasst werden, der ausgehend von der Konstruktionslehre mit dem Produkt im Mittelpunkt im Laufe der Zeit um zusätzliche Aspekte erweitert wurde. Das Systems Engineering ist hingegen ein „Top-Down“-Ansatz, in dem ausgehend von einer abstrakten Zielsetzung der Prozess der lebenszyklusgerechten Entwicklung durch Zerlegung in handhabbare Teile sowie deren Koordination unterstützt wird. Ein weiterer Unterschied besteht in den betrachteten Systemen. In der IPE steht primär die Entwicklung eines technischen Systems im Fokus, während hingegen das SE sich grundsätzlich mit jeder Art von System befassen kann. Dies beinhaltet z. B. soziale System, Verkehrsinfrastruktur, Energieversorgung oder das Zusammenwirken unterschiedlicher Arten von Systemen (System-of-Systems), in denen technische Systeme nur als Elemente auftauchen (z. B. Städte).

Es existieren in der aktuellen Forschung verstärkt Bestrebungen zur Nutzung von Synergien aus beiden Ansätzen (siehe z. B. [LINDEMANN ET AL. 2010; EIGNER ET AL. 2012; GAUSEMEIER & LINDEMANN 2012]). Dazu sollen Gedanken, Methoden und Ansätze des Systems Engineering im Rahmen der Produktentwicklung nutzbar gemacht werden. Diese Aktivitäten umfassen zurzeit ganzheitliche Modelle und Methoden zur Unterstützung der transdisziplinären Zusammenarbeit, des Anforderungs- und Prozessmanagements, der Entwicklung funktionaler Baukästen sowie der Modellierung und Optimierung der Systemarchitektur. Für die Entwicklung mechatronischer Produkte sind hierbei vor allem die Ansätze zur disziplinübergreifenden Planung und Koordination des Entstehungsprozesses sowie zur Integration und Absicherung verteilter (Teilsystem-)Entwicklungen aus dem Systems Engineering von Interesse. Diese Bereiche sind für den Großteil der identifizierten Probleme verantwortlich (siehe Kap. 2). Der Gedanke der Integration unterschiedlicher Ansätze lässt sich noch erweitern. Unter „Enginee-

ring Systems“ wird ein umfassenderen Ansatz zur Lösung komplexer technischer Probleme verstanden [KOSSIAKOFF ET AL. 2011, S.33F]. Im Vergleich zum SE ist dieser Ansatz auf eine gleichwertige Betrachtung von Prozess und Produkt unter Einziehung von Modellen und Methoden aus Ingenieurwissenschaften, Management sowie Sozialwissenschaften ausgerichtet.

### **Model-based Systems Engineering**

Ein für die Entwicklung mechatronischer Produkte relevanter Ansatz innerhalb des Systems Engineering stellt das „**Model-based Systems Engineering**“ (MBSE) dar. In diesem werden Systemmodelle in den Mittelpunkt der Entwicklung gestellt und als zentrale Medien zur Steuerung des SE-Prozesses über alle Phasen (Spezifikation, Entwicklung, Integration, Validierung, Einsatz) verwendet. Dies stellt einen Paradigmenwechsel weg von der traditionellen, dokumentenbasierten Entwicklung dar, die meist in Phasen abläuft (siehe oben). Im MBSE ist der Entwicklungsprozess eine iterative Abfolge von Aktivitäten zur Entwicklung und Erstellung zunehmend detaillierterer Modelle bzw. eines übergreifendes Systemmodells über der Zeit [ESTEFAN 2008, S.10FF]. Es existiert auch hier eine Vielzahl von Vorgehensmodellen, Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung der modelbasierten Entwicklung. Die Modellierung des Systems erfolgt zumeist mit Hilfe von UML (Unified Modeling Language) bzw. SysML. Einen umfassenden Überblick zu MBSE gibt [ESTEFAN 2008], die Modellierung mit SysML und UML finden sich bei [WEILKIENS 2008; FRIEDENTHAL et al. 2011; HOLT & PERRY 2008].

Der MBSE-Ansatz gewinnt auch im Rahmen der Entwicklung mechatronischer Produkte zunehmend an Bedeutung (siehe z. B. [DOROCIAC & TSCHIRNER 2010]). Die Treiber einer modelbasierten Entwicklung aus Perspektive des Wissensmanagements betrachten [LARSES & ADAMSSON 2004]. Es existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur modelbasierten Entwicklung mechatronischer Systeme mit unterschiedlichen Schwerpunkten wie der Modellierung von Komponenten [THRABOULIDIS 2008], dem Wissensmanagement [ADAMSSON 2007], der Unterstützung der Architekturentwicklung [KLEINER 2003; SELL 2007; CHEN et al. 2009; KOMOTO & TOMIYAMA 2010; ANACKER et al. 2011] sowie dem Management von Modellen [ELKHOURY 2006].

Eine weitere relevante Anwendungsmöglichkeit besteht in der Nutzung des MBSE-Ansatzes zur Koordination und Synchronisation der disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse in der Phase des domänenspezifischen Entwurfs. Durch die Arbeit an vernetzten Modellen bzw. einem integrierten Systemmodell sind die Informationen über den aktuellen Entwicklungsstand stets für alle Disziplinen verfügbar. Ebenso sind im Falle von Änderungen die Auswirkungen auf die übrigen Teilsysteme erkennbar, was insgesamt zu einer Erhöhung der Transparenz und des Systemverständnisses beiträgt. Durch die Vorgabe spezifischer Entwicklungsstände bzw. Detaillierungsgrade des Modells lässt sich eine zeitliche Planung und Synchronisation der Produktkonkretisierung realisieren (siehe auch Kap. 3.5).

Dieser Ansatz wurde jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt, da er die Existenz eines integrierten, disziplinübergreifenden Modells des mechatronischen Systems erfordert. Dieses ist in den entwickelnden Unternehmen als eine relevante Zielgruppe aktuell meist nicht bzw. nur in Ansätzen vorhanden (vgl. Kap. 2.3).

### 3.3 Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung

*Im Zusammenhang mit mechatronischen Produkte und mechatronischen Entwicklungsprozessen wurde mehrfach der Begriff „komplex“ verwendet bzw. von einer „hohen Komplexität“ gesprochen. Wie ebenfalls bereits angesprochen, wird in der wissenschaftlichen Literatur sowie in der Praxis ein Umgang bzw. die Beherrschung der Komplexität gefordert (siehe Kap. 2). Im Folgenden werden daher diese Begriffe im Kontext dieser Arbeit präzisiert sowie grundlegende Ansätze zum Umgang mit Komplexität vorgestellt.*

#### 3.3.1 Grundlagen des Komplexitätsmanagements

Der Begriff **Komplexität** wird im Rahmen der Produktentwicklung in der Literatur sowie in der Praxis häufig verwendet, jedoch besteht zumeist kein einheitliches Verständnis des Begriffs und es werden verschiedene Aspekte und Betrachtungen von Komplexität miteinander vermischt [WEBER 2005b, S.2]. So stellen GERALDI ET AL. fest, dass in der Wissenschaft bei der Betrachtung komplexer Entwicklungsprojekte zwei grundsätzliche Forschungsrichtungen zu unterscheiden sind: Komplexität *in* Projekten sowie Komplexität *von* Projekten. Im ersten Betrachtungsfall werden Projekte aus dem Blickwinkel unterschiedlicher Komplexitätstheorien analysiert und beschrieben, der zweite Fall ist anwendergetrieben und befasst sich mit der Identifikation von Charakteristika komplexer Entwicklungsprojekte sowie den damit verbundenen Reaktionen von Personen und Organisationen [GERALDI et al. 2011, S.967F]. Die im Zusammenhang mit mechatronischer Produkten adressierte Komplexität kann, dem Ansatz von [ZIRKLER 2010, S.33FF] folgend, aus der kombinierten Betrachtung verschiedener Ansätze zur Beschreibung von Komplexität hergeleitet werden.

In einem aus der Komplexitätsforschung stammenden Ansatz schlägt MANSON eine Typologie vor, in der er drei grundsätzliche Betrachtungsformen von Komplexität unterscheidet [MANSON 2001, S.405]: Der **algorithmischen Komplexität**, im Verständnis der mathematischen Komplexitätstheorie und der Informationstheorie, liegt die Annahme zu Grunde, dass die Komplexität aus der Schwierigkeit zur Beschreibung eines Systems herrührt. Die **deterministische Komplexität** befasst sich mit der Chaostheorie und der Katastrophentheorie, in denen davon ausgegangen wird, dass die Wechselwirkungen von zwei oder drei Schlüsselfaktoren ein weitgehend stabiles System erzeugen können, das jedoch anfällig für plötzliche Diskontinuitäten ist. Die **aggregierte Komplexität** beschäftigt sich mit dem Zusammenwirken von Einzelementen, die ein System mit komplexem Systemverhalten bilden. Die ersten beiden Bereiche erfassen und beschreiben Komplexität mit Hilfe von mathematischen Gleichungen und Annahmen, während in der aggregierten Komplexität die Ganzheitlichkeit des Systems sowie Synergien aus dem Zusammenwirken der Systemelemente untersucht werden [MANSON 2001, S.409].

Die aggregierte Komplexität wird nach MANSON über die Relationen der Systemelemente, der internen Systemstruktur, der Umgebung des Systems, des entstehenden Systemverhaltens sowie der zeitlichen Veränderung und Entwicklung des Systems beschrieben [MANSON 2001, S.409f]. Aus der Kombination der ersten beiden Aspekte ergibt sich die häufig verwendete Definition der **strukturellen Komplexität** nach [PATZAK 1982, S.22FF], die sich aus Anzahl und Verschiedenartigkeit der Elemente und Relationen ergibt (siehe Bild 3-13). Diese Art der

Komplexität ist meist im Kontext mechatronischer Produktentwicklung gemeint und ergibt sich aus dem interdisziplinären Zusammenwirken der Elemente (Produktsicht, siehe Kap. 3.1.3) sowie der Integration der beteiligten Domänen in einen gemeinsamen Entwicklungsprozess (Prozesssicht, siehe Kap. 3.1.4).

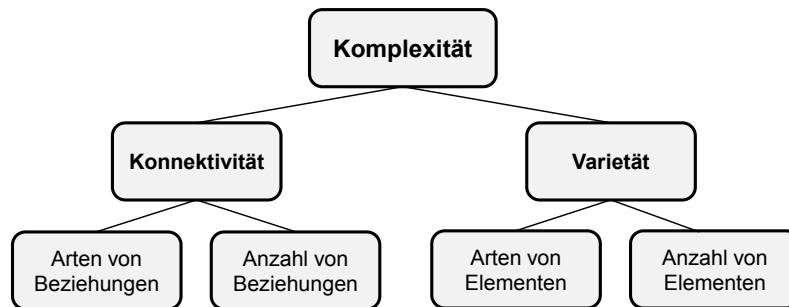


Bild 3-13: Strukturelle Merkmale von Komplexität [nach PATZAK 1982, S.22]

Aus dem Blickwinkel der Regelungstechnik ist zumeist die **dynamische Komplexität** mechatronischer Systeme relevant. Die letzten beiden von MANSON genannten Aspekte (Systemverhalten und Veränderung des Systems) stellen dafür erste Indikatoren dar. Nach DÖRNER hat neben der Anzahl und Art der Zustände des Systems weiterhin die Variabilität der Struktur sowie das Systemverhalten (Systemfunktion) einen wesentlichen Einfluss auf die dynamische Komplexität [DÖRNER 2003, S.62FF]. Die Dynamik und Veränderung des Systems wird stark von der Offenheit der Systemgrenze und damit der Interaktion zu anderen Systemen beeinflusst [FELGEN 2007, S.15], wodurch auch die Systemumgebung mit in die Komplexitätsbetrachtung einfließt.

Das in Bild 3-13 dargestellt Verständnis von Komplexität erweitert WEBER produktbezogen um die durch Varianten verursachte Komplexität sowie um die Dimension Prozess. Als Komplexitätstreiber im Prozess nennt er die beteiligten Disziplinen sowie die Organisation [WEBER 2005b, S.4F]. Nach LINDEMANN ET AL. sind in der Produktentwicklung die vier Dimensionen von Komplexität ganzheitlich zu betrachten: Marktkomplexität (extern) sowie Produkt-, Prozess-, und Organisationskomplexität (intern) [LINDEMANN et al. 2008, S.26]. Ein weiterer Aspekt wird von MALIK genannt, der die strukturelle Unsicherheit (Unkenntnis der Verknüpfung von Elemente) als ein Merkmal von Komplexität bezeichnet [MALIK 2003, S.292]. Hieraus folgert MAURER, dass eine verringerte Komplexität zu geringeren Unsicherheiten in der Produktentwicklung führt [MAURER 2007, S.33].

In dieser Arbeit steht die Betrachtung der **strukturellen Komplexität von Produkt und Prozess** im Mittelpunkt, da ihre Eigenschaften im Wesentlichen von ihrer Struktur beeinflusst werden [vgl. LINDEMANN et al. 2008, S.10FF]. Für die Optimierung von Entwicklungs- und Produktionsprozessen mit Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements finden sich diverse Beispiele in der Literatur (z. B. [DANILOVIC & SANDKULL 2002; BROWNING & EPINGER 2002; JARRATT 2004; WYNN 2007]). Da die am Prozess beteiligten Individuen in eine Organisation eingebunden sind (Entwicklungsteams, Abteilungen), werden auch Aspekte der **Organisationskomplexität** adressiert, diese stehen jedoch nicht im Fokus. Der Aspekt der



Marktkomplexität ist hingegen hier nicht relevant, da das festgelegte Produktkonzept als Randbedingung angesehen wird (siehe Kap. 2.3).

Der starke **Verknüpfung von Produkt- und Prozesskomplexität** sowie die Notwendigkeit der gemeinsamen Betrachtung werden bei verschiedenen Autoren betont [GÖPFERT 1998; BALDWIN & CLARK 2000; EPPINGER & SALMINEN 2001; BAUMBERGER 2007, S.55F] (vgl. auch Kap. 2.2). Auf Grundlage einer umfassenden literaturbasierten Studie entwickelten GERALDI ET AL. eine generische Typologie zur Charakterisierung und Klassifizierung komplexer Projekte<sup>34</sup>. Ziel des Ansatzes ist die Schaffung eines Verständnisses, was Komplexität in Projekten ausmacht, welche Arten von Komplexität auftreten und diese in einer einheitlichen Sprache zu beschreiben [GERALDI et al. 2011, S.968]. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die strukturelle Komplexität in Projekten am häufigsten betrachtet wird und durch die drei Merkmale Anzahl (size), Varietät (variety) sowie Abhängigkeiten (interdependence) der Elemente charakterisiert wird<sup>35</sup> [GERALDI et al. 2011, S.976]. Diese Auffassung stimmt sehr gut mit dem oben gezeigten Verständnis von Komplexität überein. Eine detaillierte Definition der Prozesskomplexität findet sich bei KREIMEYER: *“Process complexity is the degree to which a process is difficult to analyze, understand or explain. It may be characterized by the number and intricacy of activity interfaces, transitions, conditional and parallel branches, the existence of loops, roles, activity categories, the types of data structures, and other process characteristics”* [KREIMEYER 2010, S.45].

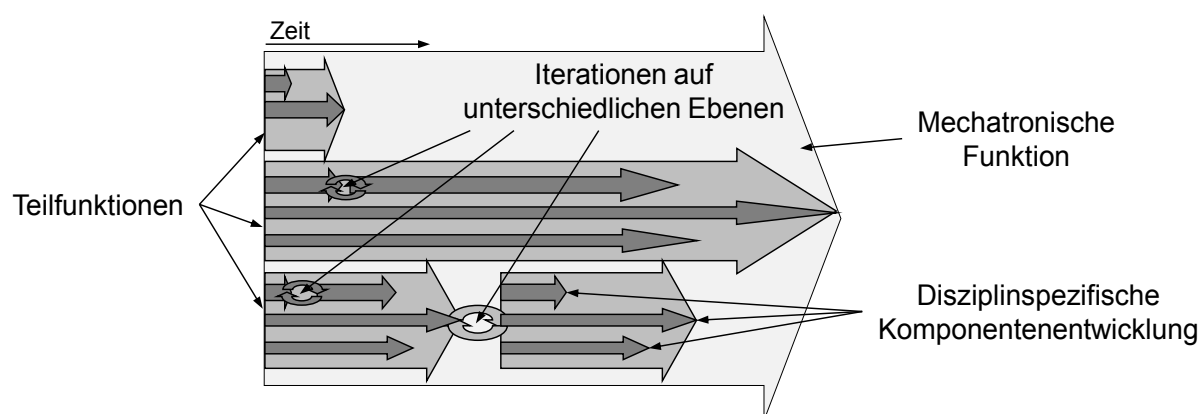


Bild 3-14: Komplexität als Folge des Zusammenwirkens disziplinspezifischer Entwicklungsprozesse  
[in Anlehnung an HELLENBRAND et al. 2010]

Zur Verdeutlichung ist ein Aspekt der Verknüpfung von Produkt- und Prozesskomplexität bei der Entwicklung mechatronischer Produkte in Bild 3-14 dargestellt. Die hohe Komplexität ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass zur Realisierung einer mechatronischen Funktion (Systemverhalten) das Zusammenwirken mehrerer Teilfunktionen erfordert, die wiederum von Komponenten unterschiedlicher Disziplinen realisiert werden. Diese disziplinspezifischen

<sup>34</sup> Die Übertragung auf Prozesskomplexität ist zulässig, da Entwicklungsprozesse häufig im Rahmen eines Projektes ausgeführt werden. Zur Definition bzw. Abgrenzung dieser Begriffe siehe Kap. 3.4

<sup>35</sup> Insgesamt identifizieren [GERALDI et al. 2011] fünf Dimensionen der Komplexität sowie deren Merkmale: structural complexity, uncertainty, dynamic, pace, socio-political complexity

schen Entwicklungsprozesse weisen unterschiedliche Vorgehensweisen und Iterationshäufigkeiten und -längen auf. Daraus ergeben sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Schnittstellen zwischen den Komponenten des Produktes sowie zwischen den Aktivitäten und Personen im Prozess, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen.

Die wesentliche Herausforderung in der Produktentwicklung besteht darin, einen Überblick über diese vielfältigen Abhängigkeiten des Austauschs, der Veränderung und Ausbreitung von Informationen zu besitzen [JARRATT et al. 2004]. MAURER merkt hierzu an, dass Komplexität nicht grundsätzlich negativ zu sehen ist sondern Ansätze zum Umgang mit ihr eingesetzt werden müssen [MAURER 2007, S.8]. Eine Vielzahl bestehender Ansätze des Komplexitätsmanagements sind eng mit dem Thema Variantenmanagement verknüpft und zielen auf eine Reduzierung der daraus entstehenden Kosten ab (vgl. [ADAM 1998; SCHUH & SCHWENK 2001; MARTI 2007]). Diese berücksichtigen jedoch nicht inhärente Komplexität mechatronischer Systeme (vgl. Kap. 2), weshalb in dieser Arbeit das Verständnis des **strukturellen Komplexitätsmanagement** nach [LINDEMANN et al. 2008, S.10F] verwendet wird. Demnach führen Kenntnisse über Struktur zu einem verbesserten Verständnis des Systems, woraus passende Schlussfolgerungen zu dessen Optimierung gezogen werden können. Im Mittelpunkt steht der aktive Umgang mit der hohen Komplexität, eine Verringerung ist nur als eine Möglichkeit anzusehen [LINDEMANN et al. 2008, S.31]. Eine hierzu passende Definition des Komplexitätsmanagements gibt PUHL: „*Komplexitätsmanagement ist die angemessene Handhabung der Komplexität um Ziele zu erreichen und das Potenzial komplexer Kompositionen zu nutzen*“ [PUHL 1999, S.23].

Die Herausforderungen aufgrund der integrierten, abstrakten Betrachtung von Produkt und Prozess sowie fehlender Möglichkeit zur Quantifizierung von Abhängigkeiten (bspw. von Aktivitäten) kann durch strukturelle Betrachtungen ebenfalls umgangen werden. Es bietet die Möglichkeit durch Modellierung quantitativer Daten ein tieferes Systemverständnis zu generieren und so Verbesserungs- und Risikopotentiale aufzudecken [LINDEMANN et al. 2008, S.17]. Die Modellierung struktureller Aspekte von Entwicklungsprozessen zeigt [KREIMEYER 2010, S.105FF] (siehe Kap. 3.4.3).

Das strukturelle Komplexitätsmanagement nach LINDEMANN ET AL. umfasst (analog zu bestehenden Ansätzen) drei Strategien: Erfassen und Bewerten, Vermeiden und Reduzieren sowie Beherrschen und Kontrollieren von Komplexität [LINDEMANN et al. 2008, S.31FF]. Das **Erfassen und Bewerten** bildet die Grundlage und umfasst die Aufnahme erforderlicher Daten, deren geeignete Modellierung sowie anschließende Analyse und Visualisierung. Die daraus gewonnenen Kenntnisse über die Struktur können zum **Vermeiden und Reduzieren** der Komplexität verwendet werden, beispielsweise durch das Auflösen von Iterationen im Prozess oder die Anwendung von Modularisierungsstrategien. Im Gegensatz dazu zielt das **Beherrschen und Kontrollieren** nicht auf die Verminderung, sondern den Umgang mit hoher Komplexität ab. Dies dann beispielsweise durch das Verfolgen und die Visualisierung von Änderungswirkungen oder die Definition von Schnittstellen zwischen Teilsystemen geschehen.

In den folgenden beiden Teilkapiteln wird daher zunächst die Modellierung und im Anschluss die Analyse komplexer Systeme betrachtet.

### 3.3.2 Modellierung komplexer Systeme auf Basis von Matrizen

Die Nutzung von Matrizen in der Produktentwicklung ist nicht grundsätzlich neu [YASSINE et al. 2003], sondern wird seit mehreren Jahrzehnten für verschiedene Aufgabenstellungen eingesetzt (z.B. [STEWART 1962; KEHAT & SHACHAM 1973; WARFIELD 1973]). So empfehlen auch HABERFELLNER ET AL. im Rahmen des Systems Engineering den Einsatz von Matrizen und Graphen für die Darstellung und Aufnahme von Strukturen [HABERFELLNER et al. 2012, S.44F]. Diese Methoden wurden in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt und verstärkt zum Umgang mit der Komplexität von Produkten und Entwicklungsprozessen eingesetzt [MAURER 2007, S.53].

Die matrixbasierten Ansätze in der Produktentwicklung können nach LINDEMANN ET AL. abhängig von der Anzahl der modellierten Elementarten (Domänen) in vier Klassen eingeteilt werden [LINDEMANN et al. 2008, S.50]: Intra-Domain Matrizen, Inter-Domain Matrizen, kombinierter Einsatz von Intra- und Inter-Domain Matrizen sowie Multiple-Domain Matrizen. Gehören die modellierten Elemente alle zur selben Domäne<sup>36</sup> wird diese als Intra-Domain Matrix bezeichnet. Werden hingegen Elemente aus unterschiedlichen Domänen (bspw. Funktionen und Komponenten) betrachtet, so liegt eine Inter-Domain Matrix vor.

Eine verbreitete Methode zur Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Elementen einer Domäne (**Intra-Domain Matrix**) ist die **Design Structure Matrix (DSM)** nach STEWARD [STEWART 1981], der diese ursprünglich zur Analyse von Abhängigkeiten innerhalb des Entwicklungsprozesses einsetzte. Eine DSM ist nach BROWNING eine quadratische Matrix (gleiche Anzahl an Zeilen und Spalten), in der sowohl in den Zeilen und Spalten die einzelnen Elemente der betrachteten Domäne in der gleichen Reihenfolge (von oben nach unten bzw. links nach rechts) eingetragen sind [BROWNING 2001]. Dabei kann es sich beispielsweise um Komponenten, Funktionen oder Prozessschritte handeln. Eine Verknüpfung von zwei Elementen wird durch einen entsprechenden Eintrag im jeweiligen Feld der Matrix modelliert. Dies kann durch ein Zeichen (1 oder X) oder durch einen numerischen Wert (0,5) geschehen. Die Diagonale (Verknüpfung eines Elements mit sich selbst) wird meist nicht betrachtet und daher ausgeblendet. In einer DSM werden normalerweise nur Elemente eines Typs abgebildet, es gibt jedoch auch Fälle in denen verschiedene Relationsarten in einer Matrix dargestellt werden [LINDEMANN et al. 2008, S.51; PIMMLER & EPPINGER 1994; JARRATT 2004].

In Kap. 3.2.2 wurde die in der Produktentwicklung verbreitete Verwendung von Netzen (Funktions- und Wirkmodelle) zur Erhöhung des Systemverständnisses und deren mathematische Interpretation als Graph dargestellt. Bei einer Matrix handelt es sich um eine andere Repräsentationsart eines Graphen, das heißt jede Matrix kann in einen Graphen überführt werden [ANDRÁSFAL 1991, S.133FF; MAURER 2007, S.52]. Die Transformation zwischen beiden Darstellungen ist grundsätzlich bekannt, jedoch werden beide Repräsentationsformen nur selten gemeinsam genutzt [LINDEMANN et al. 2008, S.40]. Die gemeinsame Anwendung ist insofern vielversprechend, da die Visualisierung als stärkebasierter Graph einfach verständlich ist und die Elemente sowie deren Vernetzung in der Struktur klar dargestellt werden [DI BATTISTA et al. 1999, S.29; LINDEMANN et al. 2008, S.48]. Weiterhin können Algorithmen aus der

---

<sup>36</sup> Eine Domäne bezeichnet nach [MAURER 2007, S.81] das primäre Klassifikationsmerkmal der modellierten Elemente. Beispiele für Domänen sind Funktionen, Komponenten, Prozessschritte oder Personen.

Graphentheorie zur Lösung von Problemen in der Produktentwicklung genutzt werden (siehe Kap. 3.3.3).

Durch die Möglichkeiten zum Befüllen der Matrix ober- und unterhalb der Diagonalen können Informationen über die Richtung der Relation modelliert werden. Der entsprechende Graph ist somit ebenfalls **gerichtet**. Werden keine Richtungsinformation abgebildet ist der zugehörige Graph **ungerichtet** und die entsprechende Matrix symmetrisch bzw. es muss nur eine Hälfte betrachtet werden. Bei symmetrischen Matrizen muss zwischen beidseitigen Abhängigkeiten und dem ungerichteten Fall unterschieden werden.

Die Modellierung der Stärke von Abhängigkeiten kann mit Hilfe eines numerischen Wertes erfolgen, in diesem Fall liegt eine **numerische DSM** vor. Numerische DSMs stellen somit einen gewichteten Graphen dar. In einer **binären DSM** wird hingegen lediglich die Existenz einer Verknüpfung modelliert, eine Unterscheidung der Verknüpfungsstärke ist nicht möglich.

BROWNING gibt einen umfassenden Überblick von Anwendungsfällen für DSMs aus unterschiedlichen Bereichen (bspw. Bauwesen, Halbleiterindustrie, Automotive, Luftfahrt, Telekommunikation, Elektronik) und unterscheidet vier DSM Grundtypen, die er in zwei Klassen zusammenfasst [BROWNING 2001]: komponenten- und teambasierte DSMs (statisch) sowie aktivitäten- und parameterbasierte DSMs (dynamisch). In *statischen DSMs* existieren die Elemente gleichzeitig (bspw. Komponenten), während in *dynamischen DSMs* die Reihenfolge der Zeilen und Spalten eine zeitliche Abfolge abbildet (bspw. Entwicklungsaktivitäten) [BROWNING 2001, S.292f]. Weiterhin nennt er typische Algorithmen zu deren Analyse (siehe Kap. 3.3.3). Beispiele für die oben genannten Anwendungsgebiete sind Analyse der Abhängigkeiten von Entwicklungstätigkeiten [EPPINGER et al. 1994], Kostenoptimierung von Produkt und Prozess [BROWNING & EPPINGER 2002], Vorhersage, Verfolgung und Visualisierung von Änderungsauswirkungen [CLARKSON et al. 2004; KELLER et al. 2005], Modularisierung und Dekomposition [SOSA et al. 2005].

Eine beispielhafte Komponenten-DSM für den Anwendungsfall der Waschmaschine zeigt Bild 3-15. In ihr wird vereinfacht die Verknüpfung von Komponenten einer automatischen Waschmitteldosierung in einer binären DSM dargestellt. Es wird ebenfalls nicht zwischen den unterschiedlichen Relationsarten (wie Energie- oder Kraftfluss) unterschieden. Der zugehörige Graph ist rechts im Bild dargestellt.

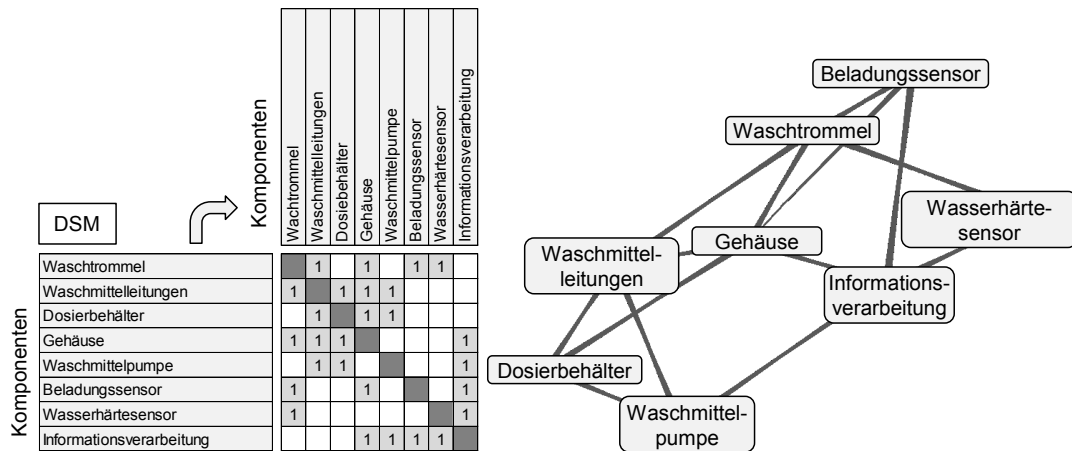


Bild 3-15: Design Structure Matrix (DSM) der Komponentenstruktur und zugehöriger Graph

Einen Ansatz zur Verknüpfung von Elementen aus zwei unterschiedlichen Domänen stellt die **Domain Mapping Matrix (DMM)** dar [DANILOVIC & BROWNING 2004], die als Gegenstück der DSM angesehen werden kann. Dabei handelt es sich folglich um eine **Inter-Domain Matrix**. Mit ihrer Hilfe können beispielsweise die Elemente der Domänen Funktionen und Komponenten miteinander verknüpft werden (siehe Bild 3-16 unten). DMMs sind rechteckig (nicht notwendigerweise quadratisch) und können wie DSMs binär oder numerisch ausgefüllt werden um die Stärke der Abhängigkeit zu modellieren. DANILOVIC & SIGEMEYR zeigen verschiedene Methoden zur Analyse von DMMs [DANILOVIC & SIGEMEYR 2003]. Eine entsprechende grafische Visualisierung, wie sie in Form stärkebasierter Graphen bei den DSMs verwendet wird, existiert für DMMs bisher nicht [LINDEMANN et al. 2008, S.120]. Die beispielhafte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen mittels DMM ist in Bild 3-16 beispielhaft dargestellt.

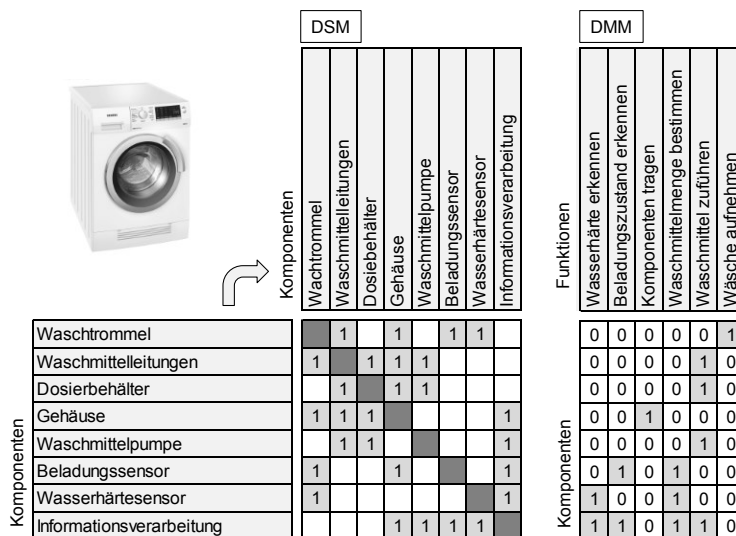


Bild 3-16: Verknüpfung von Komponenten- und Funktionsstruktur mittels Domain Mapping Matrix (DMM) (Bild mit freundlicher Genehmigung der Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH)

Die **kombinierte Verwendung von Intra- und Inter-Domain Matrizen**, also gleichzeitiger Einsatz von DSM und DMM, ermöglicht die gleichzeitige Betrachtung von Elementen mehrerer Domänen sowie deren domänenübergreifende Abhängigkeiten. EPPINGER & SALMINEN betonen beispielsweise die gesamthafte Betrachtung von Produkt-, Prozess- und Organisationsstruktur als Grundlage für erfolgreiche Produktentwicklung. In ihrem Ansatz verwenden sie drei DSMs für die betrachteten Domänen sowie drei separate DMMs um diese miteinander zu verknüpfen [EPPINGER & SALMINEN 2001]. Eine weit verbreitete kombinierte Anwendung von Matrizen ist das House of Quality im Rahmen des Quality Function Deployment (QFD) [HAUSER & CLAUSING 1988]. In der Axiomatic Design Theorie nach SUH werden vier unterschiedliche Domänen (Anforderungen, Funktionen, Komponenten, Prozesse) aufeinander abgebildet, die in einem iterativen Prozess detailliert werden [SUH 1998]. LINDEMANN verwendet DSMs und DMMs zur Strukturierung von Problemen im Entwicklungsprozess [LINDEMANN 2009, S.121F]

Als konsequente Weiterentwicklung stellt MAURER einen generischen Ansatz zum kombinierten Einsatz von DSM und DMM auf: die **Multiple-Domain Matrix (MDM)**. Er beschreibt eine umfassende Methodik zur Erstellung, Analyse und Interpretation von MDMs sowie der dazu notwendigen Berechnungsmethoden [MAURER 2007, S.60FF]. Eine MDM kann auch als eine detaillierte DSM aufgefasst werden, auf deren Diagonalen sich einzelne DSMs sowie abseits davon verschiedene DMMs angeordnet sind. Als Beispiele für die Anwendung von MDMs nennt MAURER die Arbeiten zum Multiprojektmanagement von [DANILOVIC & BÖRJESSON 2001], die „Connectivity Maps“ von [YASSINE et al. 2003] sowie die K- & V-Matrix von [PULS 2003]. Der Aufbau einer MDM sowie die grundlegenden Berechnungsmöglichkeiten sind in Bild 3-17 dargestellt.

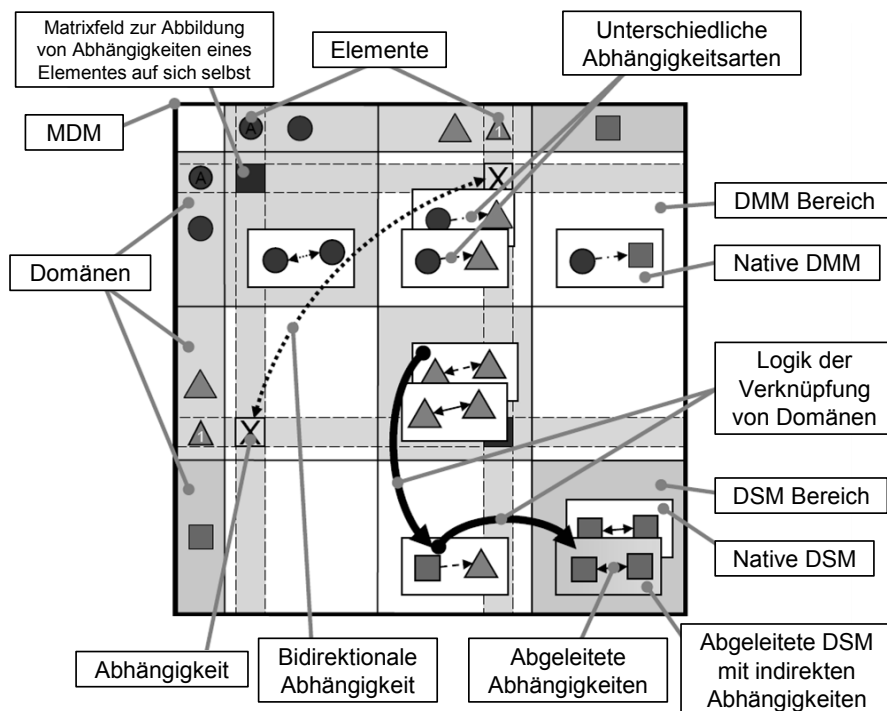


Bild 3-17: Aufbau einer Multiple-Domain Matrix (MDM) [nach MAURER 2007, S.80]

Das dargestellte strukturelle Komplexitätsmanagement auf Basis von Matrizen eignet sich somit grundsätzlich zur Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse. Die Verwendung einer Multiple-Domain Matrix ermöglicht die integrative Betrachtung von Produkt- und Prozessstruktur sowie deren wechselseitige Abhängigkeiten. Mit Hilfe der Berechnungsmethoden können indirekte Abhängigkeiten (siehe Kap. 3.3.3) zwischen den Disziplinen identifiziert werden, die für eine Vielzahl von Problemen im Prozess verantwortlich sind. Die Modellierbarkeit der Produktarchitektur (Funktionen, Komponenten, vgl. Kap. 3.2.2) wurde bereits mit den angeführten Beispielen gezeigt. Die strukturelle Modellierung von Entwicklungsprozessen sowie den darin enthaltenen Artefakten zeigt [KREIMEYER 2010]. Der gewählte Ansatz erlaubt die rein qualitative Modellierung von Abhängigkeiten, so dass unterschiedliche Arten von Relationen sowie aggregierte Sichtweisen in einem Modell verwendet werden und in die Analyse einfließen können. Ein weiterer Vorteil der abstrakten, strukturellen Sichtweise ist die Domänenunabhängigkeit des Modells. Es kann somit von allen Disziplinen verstanden werden und ermöglicht darüber hinaus einen Wechsel zwischen Funktions- und Bauteilsicht (vgl. Kap. 2.2) sowie deren kombinierte Betrachtung.

### 3.3.3 Ansätze zur Analyse und Optimierung komplexer Systeme

Im Folgend wird auf das Vorgehen sowie die eingesetzten Berechnungsmethoden zur strukturellen Analyse und Bewertung komplexer Systeme eingegangen. Grundlegendes Ziel der Analysen ist es, durch (erweiterte) Kenntnisse über die Struktur das Systemverständnis zu erhöhen und daraus geeignete Maßnahmen zur Optimierung bzw. zur verbesserten Handhabung des Systems abzuleiten. Dies kann nach LINDEMANN ET AL. bereits durch die intensive Beschäftigung mit dem System sowie geeigneter Visualisierung erreicht werden [LINDEMANN et al. 2008, S.37FF]. Die gezeigten matrixbasierten Ansätze sind aufgrund ihrer Einfachheit, Kompaktheit sowie der grafischen Darstellung grundsätzlich geeignet ein erweitertes Systemverständnis für alle Beteiligten zu schaffen [BROWNING 2001].

Ein allgemeines Vorgehen zum strukturellen Komplexitätsmanagement bestehend aus fünf Schritten beschreibt [MAURER 2007, S.69F]: Systemdefinition, Informationsakquise, Systemmodellierung, Strukturanalyse und -bewertung sowie Anwendung auf das System. Bei der *Systemdefinition* wird abhängig von der betrachteten Problemstellung ein geeignetes Modell (normalerweise eine MDM), die zu betrachtenden Domänen und Relationen sowie deren Detaillierungsgrad definiert. In der *Informationsakquise* werden die zu modellierenden Informationen beschafft und aufbereitet, wobei zwei Vorgehensweisen unterschieden werden können [MAURER 2007, S.93F]: Anforderungsgetrieben (Was wird benötigt?) und opportunistisch (Was ist verfügbar?). In der *Modellierungsphase* werden diese Daten in die MDM überführt und relevante Blickwinkel auf die Struktur sowie Berechnungs- und Visualisierungsmöglichkeiten festgelegt. Diese drei Schritte sind stark vom betrachteten System und der Problemstellung abhängig. Sie werden daher für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall in Kap. 5.5 - 5.9 detailliert dargestellt.

Im Rahmen der Analyse weist MAURER weiterhin auf die Möglichkeit und Notwendigkeit zur **Ableitung indirekter Abhängigkeiten** in einer MDM hin [MAURER 2007, S.110FF]. Diese ergibt sich einerseits daraus, dass in komplexen Systemen nicht alle Abhängigkeiten und Effektketten erfasst werden können [PUHL 1999, S.10] sowie dass die erforderlichen Informati-

onen nicht oder nur sehr aufwändig zu erfassen sind. Indirekte Abhängigkeiten liegen beispielsweise vor, wenn zwei Personen an einem Dokument arbeiten bzw. Informationen aus diesem Dokument benötigen. Ändert eine Person dieses Dokument zu einem späteren Zeitpunkt im Prozess oder wird mit der Erstellung nicht rechtzeitig fertig, hat dies einen Einfluss auf die Arbeit der zweiten Person. Wesentlich komplexer wird der Fall, wenn die Personen an unterschiedlichen Komponenten aus unterschiedlichen Disziplinen arbeiten, die jedoch über eine Schnittstelle (bspw. Geometrie) miteinander verknüpft sind. In diesem Fall wird durch die Änderung an einer Komponente die Arbeit der zweiten Person ebenfalls beeinflusst, da diese ihre Komponenten ggf. anpassen muss. Wie bereits beschrieben, sind diese indirekten und dadurch meist unbekannteren Abhängigkeiten eine häufige Ursache für Probleme in mechatronischen Entwicklungsprozessen.

MAURER stellt die sechs generischen Fälle zur Ableitung von Netzwerken indirekter Abhängigkeiten sowie die notwendigen Matrixberechnungen dar (siehe Bild 3-18) [MAURER 2007, S.82ff]. Er konzentriert sich dabei auf die Ableitung von DSMs aus DMMs bzw. der Kombination von DSMs und DMMs. Nach [YASSINE et al. 2003] können analog auch DMMs über entsprechende Mappinglogiken abgeleitet werden, dies wird aufgrund fehlender Analyse- und Interpretationsansätze bei MAURER nicht weiter verfolgt [MAURER 2007, S.79]. Eine detaillierte Übersicht der Möglichkeiten sowie die zugehörigen Berechnungsmethoden sind im Anhang 9.2 zu finden.

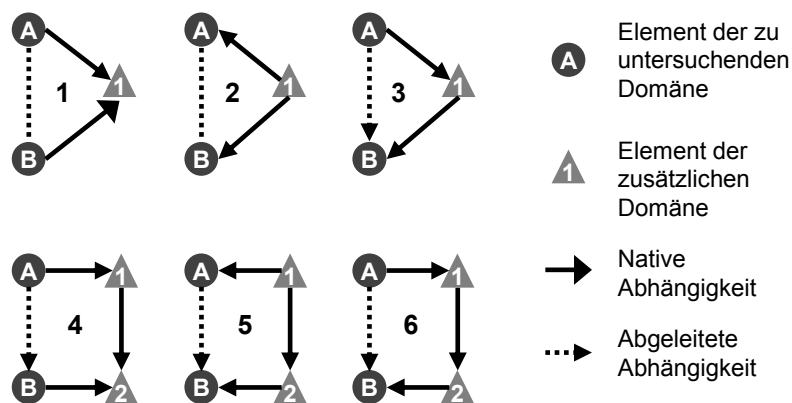


Bild 3-18: Ableitung indirekter Abhängigkeiten in einer MDM [nach MAURER 2007, S.85]

Die Ableitung indirekter Abhängigkeiten soll hier am Beispiel der Waschmaschine über die Verknüpfung von Funktions- und Komponentenstruktur verdeutlicht werden. Aus der in Bild 3-16 dargestellten DMM zur Anbindung von Funktionen an Komponenten kann ein Funktionsnetzwerk abgeleitet werden (Fall 1). ZIRKLER bezeichnet dies als **physikalische Funktionsstruktur** [ZIRKLER 2010, S.42]. Die Funktionen in diesem Netzwerk (DSM) sind miteinander verknüpft, weil sie durch gemeinsame physikalische Komponenten realisiert werden (siehe Bild 3-19). Ebenso ist aus der DMM auch eine Berechnung der funktionalen Komponentenstruktur möglich.



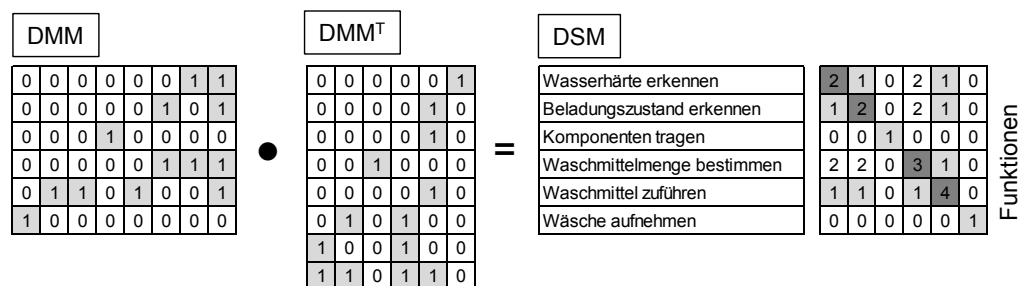


Bild 3-19: Ableitung indirekter Abhängigkeiten am Beispiel der Funktionsstruktur

Zur detaillierten Analyse und Bewertung von beliebigen Systemstrukturen können verschiedene Ansätze zur Anwendung kommen: Matrixanalysen durch geeignetes Umsortieren der Zeilen und Spalten, die Verwendung von Kennzahlen und Metriken zur Beschreibung des Systems sowie Identifikation und Interpretation von Strukturmerkmalen auf Grundlage der Graphentheorie.

Zur Analyse von DSMs werden nach [BROWNING 2001] in erster Linie zwei Analysestrategien verwendet: In **statischen DSMs** werden durch Clustering stark vernetzte Elemente identifiziert während in **dynamischen DSMs**, die eine zeitliche Abfolge beschreiben, durch Tearing und Partitionierung Rückschritte und Iterationen identifiziert werden. Eine detaillierte Übersicht und Beschreibung der Ansätze findet sich bei [MAURER 2007, S.225-231]. Die Anwendung des Clustering bei DMMs beschreiben [DANILOVIC & BROWNING 2004], die es zum Multiprojektmanagements einsetzen. Eine umfangreiche und detaillierte Unterscheidung von Analysestrategien wie bei DSMs existiert für DMMs jedoch bisher nicht.

Für die Charakterisierung von Systemen mit Hilfe von Metriken und Kennzahlen finden sich unterschiedliche Ansätze und die Thematik gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Ansätze zielen darauf ab, möglichst objektive Kennzahlen zur Messung der Komplexität oder zur Beschreibung von Eigenschaften der Struktur zu finden und diese entsprechend zu interpretieren. Diese Kennzahlen können sich auf einzelne Elemente, Teile der Struktur sowie das Gesamtsystem beziehen. SUMMERS & SHAH zeigen Metriken zur Messung der Komplexität von Entwurfsaufgabe, Prozess und Produkt im Rahmen der Produktentwicklung [SUMMERS & SHAH 2010]. Die Anwendung von Metriken zur Beschreibung und Analyse von Entwicklungsprozessen auf Basis bekannter Prozessmodelle<sup>37</sup> beschreiben [CARDOSO 2005; KREIMEYER 2010].

Als weitere Möglichkeit der Systemanalyse, neben den oben genannten Strategien der Matrixanalyse, nennt MAURER die Identifikation und Interpretation von charakteristischen Konstellationen bzw. Mustern in der Struktur [MAURER 2007, S.122ff]. Diese ergeben sich aus der Anordnung der Elementen und Relationen des Systems und werden als **Strukturmerkmale**<sup>38</sup> bezeichnet. Die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung und Analyse der Elemente und Relationen bietet die Graphentheorie. In ihr wird das System mit Hilfe von Elementen

<sup>37</sup> Eine Übersicht von Prozessmodellen (EPK, ARIS, usw.) findet sich in Kap. 3.4.3

<sup>38</sup> Beispiele für Strukturmerkmale sind: Blattknoten, isolierte Knoten, Cluster, Vernetzungsgrad, usw.

und deren Relationen beschrieben [BOLLOBÁS 1990]. Die Elemente werden als **Knoten**, die Relationen als **Kanten** des Graphs abgebildet. Eine Übersicht der Grundlagen der Graphentheorie, Analysealgorithmen sowie ihrer Anwendungen auch in der Produktentwicklung findet sich bei [GROSS & YELLEN 2006; BOLLOBÁS 1990].

In Abhängigkeit des Analysegegenstandes und der Problemstellung nennt MAURER drei Klassen von Strukturmerkmalen [MAURER 2007, S.122]: Eigenschaften einzelner Knoten und Kanten, Eigenschaften von Teilsystemen sowie Eigenschaften von Gesamtsystemen. Bei der Interpretation von strukturellen Analyseergebnissen ist grundsätzlich zu beachten, dass die Aussagekraft von Metriken und Strukturmerkmalen stets abhängig von der Problemstellung, dem betrachteten System und dessen Kontext ist [KORTLER et al. 2009]. Ebenso ist die Aussagekraft einzelner Eigenschaften der Struktur begrenzt, so dass verschiedene Merkmale in Kombination betrachtet werden müssen [LINDEMANN et al. 2008, S.143]. Eine Übersicht der Strukturmerkmale befindet sich im Anhang 9.3 sowie beispielhaft für die Waschmaschine in Bild 3-20. Eine detaillierte Übersicht mit Beschreibungen und Anwendungen findet sich bei [MAURER 2007, S.198FF] sowie [LINDEMANN et al. 2008, S.201FF].

Die durchgeführten Analysen dienen der Erhöhung des Verständnisses der strukturellen Abhängigkeiten sowie der Identifikation von Handlungsschwerpunkten im System. Aus gewonnenen Erkenntnissen können im letzten Schritt geeignete Maßnahmen zur Optimierung bzw. verbesserten Handhabung des Systems abgeleitet werden. Dazu müssen die Erkenntnisse in den Entwurfsprozess zurückgeführt werden. Hierfür schlägt [MAURER 2007, S.135FF] zwei Vorgehensweisen vor: Im Fall einer grundlegenden Strukturoptimierung schlägt er eine Kombination aus struktureller ABC-Analyse und Tearingansatz vor. Hiermit können Elemente sowie Relationen mit großem Einfluss auf die Struktur und die Komplexität des Systems identifiziert werden. Eine Optimierung kann beispielsweise durch die Eliminierung von Elementen oder Relationen (auch automatisiert) erfolgen. Falls die Struktur des Systems nicht grundlegend geändert sondern die Handhabung verbessert werden soll, schlägt MAURER den Einsatz eines Strukturhandbuchs vor. Mit diesem können Änderungen an der Struktur sowie deren Auswirkungen geplant, analysiert und vorhergesagt werden, so dass diese zielgerichteter umgesetzt werden können [MAURER 2007, S.136].

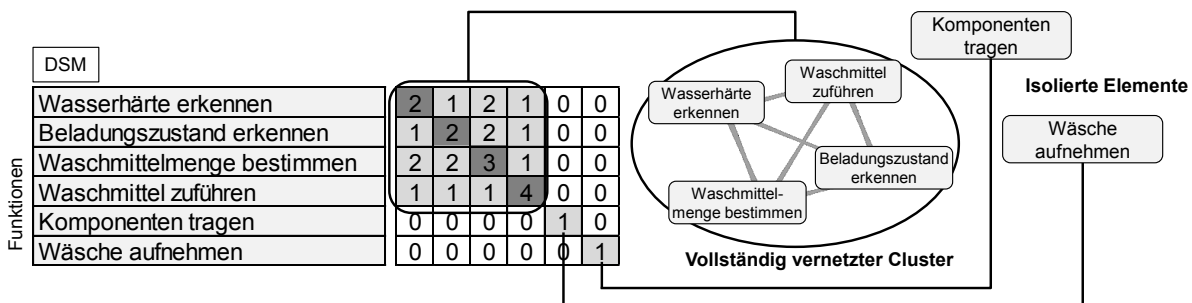


Bild 3-20: Strukturmerkmale am Beispiel der physikalischen Funktionsstruktur

In seiner Arbeit stellt MAURER ein generisches Rahmenwerk zur Interpretation der dargestellten Strukturmerkmale auf [MAURER 2007, S.198FF]. Im Bereich des für diese Arbeit relevanten

ten Prozessmanagements fokussiert er sich auf die Betrachtung von Kreisschlüssen. Für die übrigen Merkmale sind seine Beschreibungen zu generisch um direkte Schlussfolgerungen für die Praxis ableiten zu können. Weiterhin betrachtet er in seinen Analysen lediglich DSMs. Zur Analyse von DMMs findet sich bei [DANILOVIC & BROWNING 2004] das Clustering, dessen Interpretation jedoch nicht weiter detailliert wird. Weiterhin zeigen BIEDERMANN & LINDEMANN Berechnungsmöglichkeiten für Kreisschlüsse in einer MDM über Domänengrenzen hinweg (anstelle einer DSM), jedoch ist auch in diesem Fall die Interpretation sehr generisch [BIEDERMANN & LINDEMANN 2008].

Ein wichtiger Aspekt ist die Visualisierung der betrachteten Strukturen. Auf die Verwendung von stärkebasierten Graphen zur Darstellung von DSMs sowie vollständiger MDMs mit Hilfe von stärkebasierten Graphen wurde in Kap. 3.3.2 hingewiesen. Da diese Darstellung einfach und domänenübergreifend verständlich ist, wird sie in der Praxis häufig eingesetzt. Für die explizite Darstellung von DMMs existiert bisher keine geeignete Darstellung neben der Matrizenform. Einen Ansatz zur dreidimensionalen Visualisierung von MDMs mit Hilfe von parallelen Ebenen zeigen [DIEHL et al. 2008; DIEHL 2009]. Auf diesen Ansatz wird in Kap. 5.9 noch weiter eingegangen, da hier die in den DMMs enthaltenen Relationen direkt sichtbar sind. Eine Übersicht zur Visualisierung komplexer Strukturen findet sich bei [KREMPEL 2005].

## 3.4 Prozess- und Projektmanagement in der Produktentwicklung

Es wurde in Kap. 3.1.4 bereits der Prozess der Produktentstehung sowie der Produktentwicklung grundlegend eingeführt. In dieser Arbeit steht die Analyse und Optimierung mechatronischer Entwicklungsprozesse im Fokus der Betrachtungen, weshalb eine detaillierte Betrachtung des Themengebietes Prozessmanagement erforderlich ist. Da Produktentwicklungsprozesse zumeist innerhalb von Projekten auftreten, erfolgt zunächst eine Betrachtung der Grundlagen des Projektmanagements sowie die Abgrenzung zum Prozessmanagement. Im Anschluss wird das zugrunde gelegte Prozessverständnis aufgezeigt, auf die speziellen Eigenschaften und Charakteristika von Entwicklungsprozessen eingegangen sowie die Betrachtungsgegenstände des Prozessmanagements erläutert. Das Management von Prozessen ist eng mit der Modellierung und Visualisierung verknüpft, die zum Abschluss behandelt werden.

### 3.4.1 Grundlagen des Projektmanagements

Die Entwicklung von Produkten findet zumeist in Form von Projekten statt [vgl. LINDEMANN 2009, S.16]. Daher wird im Folgenden auf die Grundlagen des Projektbegriffes sowie die Prozessplanung und Prozesskontrolle als für diese Arbeit relevante Bestandteile des Projektmanagements eingegangen.

Nach dem PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI) ist unter einem **Projekt**: *“a temporary endeavour undertaken to create a unique product, service or result“* zu verstehen [PMI 2008, S.5]. Die DIN 69901 definiert Projekt als *„Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit seiner Bedingungen in seiner Gesamtheit gekennzeichnet ist“* [DIN 1987]. Diese projektspezifischen Randbedingungen sind beispielsweise eine definierte Zielvorgabe (Ergebnis), zeitliche, finanzielle und personelle Begrenzungen (Ressourcenzuweisung), Abgrenzung gegen-

über anderen Vorhaben, eine projektspezifischen Organisation sowie eine gewisse Einmaligkeit in der Durchführung (keine Routineangelegenheit) [BURGHARDT 2008, S.22; HABERFELLNER et al. 2012, S.166]. Die Hauptkriterien zur Definition eines Projektes sind demnach die Eindeutigkeit der Aufgabenstellung, eine definierte Dauer mit festem Endtermin, ein abgestimmtes Kostenvolumen sowie klare Verantwortung [BURGHARDT 2008, S.22]. In der Projektdefinition von [KERZNER 2009, S.2] wird Projekt als Abfolge von Aktivitäten und Arbeitsschritten beschrieben, die zur Erfüllung einer spezifischen, klar definierten Zielsetzung führen, einen definierten Start- und Endtermin sowie Kostenumfang besitzen und Ressourcen verbrauchen. Aus diesem Verständnis von Projekt als Summe von „*Aktivitäten, die für das Erreichen eines gesetzten Projektziels [...] erforderlich sind*“ [BURGHARDT 2008, S.22], wird die enge Beziehung zwischen Projekt und Prozess deutlich. Die Abgrenzung besteht darin, dass ein Projekt ein zielorientiertes Vorhaben zur Erstellung eines Ergebnisses darstellt, während ein Prozess durch das eigentliche Vorgehen, d. h. den Planungs- und Realisierungsablauf der zur Zielerreichung erforderlichen Aktivitäten, kennzeichnet ist [BURGHARDT 2008, S.21f]. ROELOFSEN sieht in Prozessen die Verknüpfung einzelner Aktivitäten im Fokus, während Projekte den organisatorischen Gesamtkontext betrachten und Instanzen von Prozessen darstellen [ROELOFSEN 2011, S.21]. Ein Projekt kann je nach Randbedingungen somit einen oder mehrere Prozesse enthalten bzw. diese auslösen [VAJNA 2005, S.369].

Das **Projektmanagement** ist nach DIN 69901 definiert als „*die Gesamt von Führungsaufgaben, Führungsorganisation, Führungstechniken und Führungsmitteln für die Abwicklung eines Projektes*“ [DIN 1987]. In analoger Weise definiert [PMI 2008, S.6]: „*Project management is the application of knowledge, skills, tools, and techniques to project activities to meet the project requirements*“. Es stellt somit die Summe aller organisatorischen und dispositiven Aufgaben zur Planung, Führung, Überwachung und Steuerung eines Projektes in inhaltlicher, zeitlicher sowie kostenmäßiger Hinsicht dar [HABERFELLNER et al. 2012, S.165]. Zielsetzung ist die Erreichung der vom Kunden akzeptierten Zielsetzung innerhalb der definierten Kosten- und Zeitvorgaben sowie unter effektiver und effizienter Nutzung der zugeilten Ressourcen [KERZNER 2009, S.3]. Das Projektmanagement umfasst nach [BURGHARDT 2008, S.15ff] im Projektablauf die vier Hauptabschnitte *Projektdefinition, Projektplanung, Projektkontrolle* und *Projektabschluss*, in denen jeweils spezifische Aufgaben zu bearbeiten sind (siehe Bild 3-21). Bei [PMI 2008, S.6; KERZNER 2009, S.3] findet sich die gleiche Einteilung, jedoch ergänzt um die Prozesse der Projektausführung. Im Systems Engineering grenzen [HABERFELLNER et al. 2012, S.167] gedanklich das Projektmanagement als Überbegriff für alle planenden, überwachenden, koordinierenden und steuernden Maßnahmen von der eigentlichen Systemgestaltung (Problemlösung im eigentlichen Sinn) ab. Ein ähnliches Konzept findet sich bei [KOSSIAKOFF et al. 2011, S.122], die das Projektmanagement in Systems Engineering (inhaltliche Aspekte) sowie Projektplanung und -steuerung unterteilen.

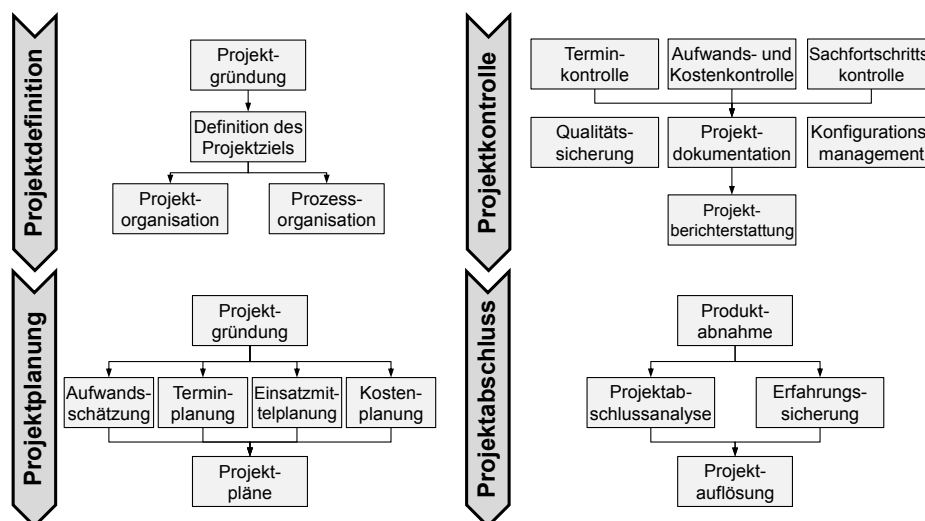


Bild 3-21: Aufgaben des Projektmanagements im Projektverlauf [nach BURGHARDT 2008, S.16]

Das Management von Projekten kann entsprechend dem Zusammenwirken der einzelnen Aufgabenbereiche als Regelkreis aufgefasst werden. In der Projektdefinition sowie -planung werden Sollvorgaben erstellt, die im Projektverlauf mit dem über eine geeignete Erfassung ermittelten Projektzustand verglichen werden. Daraus können in der Projektsteuerung geeignete Maßnahmen abgeleitet und eingesteuert werden [WIBLER 2006, S.61F, BURGHARDT 2008, S.20F]. Nach [ROELOFSEN 2011, S.20] werden unterschiedliche Ansätze des Projektmanagements, wie die Anwendung von Lean Thinking oder agiles Projektmanagement, in der Literatur diskutiert, die jedoch alle die dargestellte Zielsetzung verfolgen. Zur zielgerichteten Auswahl geeigneter Managementmethoden ist eine geeignete Klassifikation von Projekten und deren Eigenschaften erforderlich [WILLIAMS 2005]. Unterschiedliche Sichten auf Projektmanagement sowie Forschungsfragen zur Erstellung von Theorien diskutiert [SÖDERLUND 2004]. Für diese Arbeit sind die Prozessplanung (als Teil der Projektplanung) sowie die Modellierung und Darstellung von Produktreifegraden (als Bestandteil der Projektkontrolle) von Interesse, weshalb auf diese im Folgenden näher eingegangen wird.

Zur eigentlichen **Planung** des Projektes bzw. seiner Prozesse schlagen [OTTO & WOOD 2001, S.75ff] ein **systematisches Vorgehen** mit fünf zentralen Schritten vor. Darin werden zunächst die zu bearbeitenden Arbeitspakete zur Entwicklung des Produktes sowie zentrale Meilensteine im Projekt identifiziert. Im Anschluss werden die Produktentwicklungsaufgaben um Teamaufgaben (Planung, Teamevaluation) ergänzt. Darauf aufbauend werden für alle Arbeitspakete der notwendige Ressourcen- (Personen, Hilfsmittel) und Zeitverbrauch abgeschätzt. Damit können die Arbeitspakete zeitlich (sequentiell und parallel) in einer Ablaufstruktur angeordnet werden. Während des Projektverlaufs werden die Fortschritte kontinuierlich überwacht und gegebenenfalls um neue Arbeitspakete ergänzt. In der Planungsphase wird eine Vielzahl unterschiedlicher Informationen (Aufgabenstruktur, Termine, Ressourcenzuweisung, etc.) festgelegt. Da sich diese nicht in einem einzelnen Plan darstellen lassen, verwenden die Prozessplaner mehrere Pläne mit spezifischen Schwerpunkten [ECKERT &

CLARKSON 2010, S.160]. Im Projektmanagement werden diese unterschiedlichen Pläne detailliert spezifiziert. Das **Vorgehen im Projektmanagement** [BURGHARDT 2008, S.154FF; JAKOBY 2010, S.121FF] ähnelt dem von OTTO & WOOD, stellt jedoch den engen Bezug zwischen Planung und dem angestrebten Ergebnis (Produkt) noch stärker heraus (siehe Anhang 9.4). Daher erfolgt zunächst eine Strukturplanung, in der ein **Produktstrukturplan** (Gliederung des Produktes) sowie daraus abgeleitet ein **Projektstrukturplan** (Hierarchie aller Aktivitäten) erstellt werden. In Verbindung mit einer Aufwandsschätzung werden darauf aufbauend im Rahmen der Aufgabenplanung ein **Ablaufplan** sowie ein **Terminplan** abgeleitet. Bei komplexen Projekten wird die Ablaufplanung häufig durch Methoden der Netzplantechnik (siehe Kap. 3.4.3) unterstützt. Die letzten Schritte bilden schließlich die Arbeits- und Einsatzmittelplanung, die auch als **Ressourcenplanung bezeichnet wird**. Weitere Vorgehensmodelle und Methoden der Projekt- und Prozessplanung aus dem Projektmanagement finden sich bei [PMI 2008, S.129FF; KERZNER 2009, S.411FF].

Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme ist nach [REDENIUS 2006, S.47] der Austausch sowie die gemeinsame Erarbeitung domänenübergreifender (Zwischen-)Ergebnisse ein zentraler Erfolgsfaktor. Die zielgerichtete domänenübergreifende Zusammenarbeit, hier als Synchronisation adressiert, kann nur durch eine entsprechende Planung und Dokumentation des Entwicklungsprozesses erreicht werden, wobei das geplante Vorgehen flexibel an Zwischenergebnisse angepasst werden muss [BICHLMAIER 2000, S.68FF]. In mechatronischen Entwicklungsprozessen ist die zeitgleiche Bearbeitung besonders ausgeprägt, so dass zur Erzielung eines optimalen Ablaufs die Synchronisation nicht an den Abschluss von Prozessphasen (z. B. Systementwurf) gekoppelt werden darf [REDENIUS 2006, S.55F]. Zur frühzeitigen Synchronisation können **Meilensteine** verwendet werden. Ein Meilenstein stellt die Festlegung von Fertigstellungspunkten für besonders wichtiger Tätigkeitsabschnitte dar und muss nicht mit dem Ende größerer Phasen übereinstimmen [BURGHARDT 2008, S.122]. Die Definition eines Meilensteines umfasst somit die Festlegung von zu erbringenden Ergebnissen (Dokumente, Produktmodelle) sowie deren Zustand. Die Darstellung von Meilensteinen kann ebenfalls mit Hilfe von Netzplantechniken erfolgen. Dabei werden die Vorgänge zur Erreichung eines Meilensteins nicht einzeln überwacht, sondern es findet lediglich eine Ergebnisabfrage statt [REDENIUS 2006, S.58].

Die Konkretisierung der im Systementwurf festgelegten Prinziplösung erfordern nach [STEFFEN 2006, S.125] einen präzise definierten Entwicklungsprozess, in dem neben den Meilensteinen auch die zu erreichenden Produktreifegrade der Systemelemente bzw. des Gesamtsystems festgelegt sind. Die Betrachtung von Produktreifegraden ist entscheidend, um den aktuellen Stand der Entwicklung erfassen und Abweichungen von den geplanten Sollvorgaben erkennen zu können. Unter einem **Produktreifegrad** ist „*der Zustand eines Produktes hinsichtlich definierter Indikatoren, zu einem beliebigen Zeitpunkt*“ [PFEIFER-SILBERBACH 2005, S.2] bzw. „*der Grad der Erfüllung der Forderungen an das Produkt*“ [WEINZIERL 2006, S.21] zu verstehen. Der Zielzustand kann dabei als Soll-Reifegrad, der momentanen Stand als Ist-Reifegrad bezeichnet werden [MÜLLER 2007, S.83]. Zielsetzung von Reifegraden ist es, Informationen bezüglich der Leistungsfähigkeit eines Untersuchungsgegenstandes verdichtet darzustellen [CHRISTIANSEN 2009, S.138]. Die Ermittlung von Reifegraden kann daher unter Verwendung unterschiedlicher Indikatoren wie Anteil der erfüllte Anforderungen (Produktfortschritt) [BURGHARDT 2008, S.395FF], abgeschlossener Arbeitspakete

(Projektfortschritt) [BURGHARDT 2008, S.397FF], erfüllter Produkteigenschaften [MÜLLER 2007, S.89], erfüllter Meilensteine oder freigegebener Dokumente [PFEIFER-SILBERBACH 2005, S.69FF] erfolgen. Zur Bestimmung des Reifegrades werden dabei immer der aktuelle Stand sowie der zu diesem Zeitpunkt geforderte Zielzustand benötigt [MÜLLER 2007, S.84F]. MÜLLER weist weiterhin darauf hin, dass Reifegrade zeitdiskret definiert sind (nur zum betrachteten Zeitpunkt) sowie nur in Kombination mit Absicherungsaktivitäten sinnvoll betrachtet werden können. Es können auch Reifegrade von Prozessen oder Betriebsmitteln betrachtet werden [WEINZIERL 2006, S.20F], die jedoch für diese Arbeit nicht von Interesse sind.

Die Erfassung von Reifegraden ist Teil der begleitenden **Projektkontrolle** (auch Projektcontrolling genannt), in der laufend der aktuelle Zustand des Projektes mit den geplanten Sollvorgaben verglichen und daraus geeignete Maßnahmen abgeleitet werden. Sie umfasst die zeitliche Terminkontrolle, die Aufwands- und Kostenkontrolle sowie die Sachfortschrittskontrolle (siehe Bild 3-21). Die Betrachtung von Produktreifegraden fällt unter die Sachmittelfortschrittskontrolle, der eine zentrale Bedeutung zukommt und die gleichzeitig die schwierigste Aufgabe darstellt [BURGHARDT 2008, S.19].

Aufgrund des transdisziplinären Charakters mechatronischer Produkte sowie der zugehörigen Entwicklungsprozesse, ergeben sich eine Reihe spezieller Herausforderungen für die Modellierung und Darstellung von Reifegraden. Auf die für mechatronische Reifegrade zu erfüllenden Anforderungen wird in Kap. 4.2 eingegangen, ein Konzept zu ihrer Modellierung und Darstellung wird in Kap. 5.8.2 vorgestellt.

### 3.4.2 Grundlagen Entwicklungsprozesse und Prozessmanagement

Produktentwicklungsprozesse stellen eine spezielle Art von Prozessen dar, weshalb zunächst eine Definition des Begriffs „Prozess“ erforderlich ist. Grundlegend beschreibt DAVENPORT einen **Prozess** als strukturierte, abgegrenzte **Menge von Aktivitäten** zur Erzeugung eines spezifischen Outputs. Ein Prozess ist somit eine spezifische, zeitlich und räumlich strukturierte, Abfolge von Aktivitäten mit Anfang und Ende sowie klar definierten Inputs und Outputs [DAVENPORT 1993, S.5]. Bei BECKER ET AL. wird Prozess als eine inhaltlich abgeschlossene, **sachlogische und zeitliche Folge** von Aktivitäten zur Bearbeitung eines prozessprägenden Objektes dargestellt [BECKER et al. 2008, S.6]. In weiteren Definitionen wie bei LEHMANN oder ROELOFSEN zu finden wird die **Transformation** eines definierten Inputs in einen definierten Output<sup>39</sup> durch eine Abfolge von Tätigkeiten fokussiert [LEHMANN 2008, S.10; ROELOFSEN 2011, S.13] sowie auf eine **hierarchische Struktur** von Prozessen (Sub-, Teilprozesse) hingewiesen [LEHMANN 2008]. Bei VAN DER AALST & VAN HEE finden sich weiterhin die Aspekte, dass die Arbeitsschritte in hohem Maße **untereinander vernetzt** sind und ihre Reihenfolge von den bestehenden Rahmenbedingungen abhängt. Die einzelnen Arbeitsschritte sind dabei in sich abgeschlossen und werden von bestimmten **Ressourcen** (Person, Maschine, Personengruppe) ausgeführt [VAN DER AALST & VAN HEE 2004, S.4].

---

<sup>39</sup> Die prozessprägenden Objekte bzw. der Output von Prozessen oder Prozessschritten werden in dieser Arbeit auch als Prozessergebnisse bezeichnet.

Das Verständnis der Produktentwicklung als **hierarchisches Netzwerk** auf verschiedenen Ebenen (vgl. auch [GAUSEMEIER et al. 2006, S.227FF]) mit unterschiedlichen Arten von Abhängigkeiten sowie die Einbeziehung der Randbedingungen wird in der Definition von KREIMEYER aufgegriffen, die das Prozessverständnis in dieser Arbeit widerspiegelt: „*A process consists of interdependent tasks that exchange information via artifacts. The process is enabled and supported by the purposeful allocation of resources and timeoriented constraints. All of these entities are interrelated, on the one hand, via the input-output relationships among tasks along the principal process flow, and, on the other hand, via other relationship types that generate the overall process network*“ [KREIMEYER 2010, S.63]. Ein Arbeitsschritt (“task”) wird hierbei als in sich abgeschlossene Arbeitseinheit verstanden, die von einer Ressource (Mensch, Maschine, etc.) ausgeführt wird<sup>40</sup>.

Zur Modellierung von Abhängigkeiten im Prozess, zur Allokation von Ressourcen sowie zur Kommunikation können in sich geschlossene **Prozessmodule** verwendet werden, die sowohl den gesamten Prozess wie auch einzelne Teilprozesse oder Aktivitäten umfassen können [GAITANIDES et al. 1994, S.22FF; SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.46]. In Entwicklungsprozessen können die einzelnen Prozessschritte mit Hilfe des allgemeinen Modells des Entwicklungsprozesses nach [EVERSHEIM & SCHUH 2005, S.60] beschrieben werden (siehe Bild 3-22). Auf die Modellierung von Prozessen wird in Kap. 3.4.3 detaillierter eingegangen.

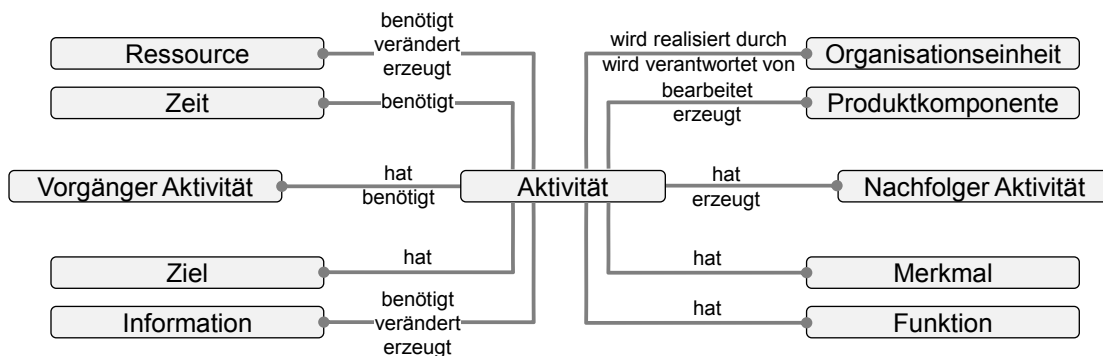


Bild 3-22: Generisches Modell des Entwicklungsprozesses [nach EVERSHEIM & SCHUH 2005, S.60]

Prozesse können somit als eine spezielle **Klasse von Systemen** aufgefasst werden (vgl. [BROWNING et al. 2006, S.105], die aus verschiedenen Elementen (z. B. Aktivitäten) sowie Relationen (z. B. Input/Output) zwischen diesen Elementen bestehen. Entsprechend diesem Verständnis weisen sie ebenfalls eine **Prozessstruktur** auf, die die Gesamtheit aller Prozessschritte auf den unterschiedlichen Hierarchiestufen umfasst [GAITANIDES et al. 1994, S.39]. Die **vertikale Prozessstruktur** bildet dabei die Aggregation der einzelnen Prozessschritte (z. B. Konstruktionstätigkeiten, Handlungen) zu (Teil-)Prozessen (z. B. gesamtes Entwicklungsvorhaben) im Sinne der Hierarchie ab, während in der **horizontalen Prozessstruktur** der Ablauf des Prozesses (zeitliche und logische Anordnung der Aktivitäten) dargestellt wird

<sup>40</sup> Die Begriffe Arbeitsschritt, Arbeitspaket, Aktivität oder Prozessschritt werden in dieser Arbeit synonym zur Beschreibung einer abgeschlossenen Arbeitseinheit verwendet.



[BAUMBERGER 2007, S.124&128FF]. Aus der Analyse des Systems mit Hilfe der beschriebenen Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements (siehe Kap. 3.3) kann ein erweitertes Systemverständnis geschaffen, sowie Aussagen zu seinem Verhalten und zu dessen Optimierung abgeleitet werden (vgl. Kap. 3.2).

In dieser Arbeit werden Produktentwicklungsprozesse betrachtet, die eine spezielle Art von Unternehmensprozessen bzw. Geschäftsprozessen darstellen. Es ist somit eine detaillierte Betrachtung ihrer Eigenschaften und eine Abgrenzung gegenüber „normalen“ Prozessen vorzunehmen. Nach ALLWEYER ist ein **Geschäftsprozess** „eine Abfolge von Funktionen (auch als Aktivitäten bezeichnet) zur Erfüllung einer betrieblichen Aufgabe, wobei eine Leistung in Form von Informations- und/oder Materialtransformation erbracht wird“ [ALLWEYER 2005, S.8]. Ergänzend dazu führen [SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.64] die Erzeugung der vom Kunden erwarteten Leistung sowie die Umsetzung der aus der Strategie abgeleiteten Ziele an. Als Beispiele für Geschäftsprozesse nennen [BECKER et al. 2008, S.7] die Auftragsabwicklung in einem Produktionsbetrieb oder die Kreditvergabe einer Bank und weisen außerdem auf die Schnittstellen zu den Marktpartnern des Unternehmens als wesentliches Merkmal hin. In den meisten Fällen werden Produktentwicklungsprozesse als eine Art von Geschäftsprozessen angesehen [SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.70; GAUSEMEIER et al. 2009b, S.31]. Es existieren jedoch auch Ausnahmen [z. B. WERTH 2007, S.31F], da in der Produktentwicklung kein direkter Kundennutzen generiert wird.

Es existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Gliederung von Geschäftsprozessen. Nach [ALLWEYER 2005, S.65] können sie bezüglich Strukturierungsgrad, Wissens-/Datenintensität, Wiederholfrequenz, Umfang/Dauer sowie in Routine- und Ausnahmeprozessen unterschieden werden. Weiterhin kann eine Untergliederung in primäre (wertschöpfend mit direktem Bezug zum Produkt) und unterstützende (zur Ausführung der primären Aktivitäten notwendig) Aktivitäten/Prozesse [BECKER et al. 2008, S.7], sowie in Kern- und Unterstützungsprozesse, Leistungs- und Steuerungsprozesse und Haupt- und Teilprozesse [STÖGER 2009, S.12FF] vorgenommen werden. Der letztgenannte Aspekt bezieht sich dabei auf den jeweiligen Detaillierungsgrad der Betrachtung. Weiterhin existieren unterschiedliche Ansätze zur Reifegradmodellierung und Leistungsmessung von Geschäftsprozessen, die beispielsweise bei [CHRISTIANSEN 2009] diskutiert werden.

Nach ROELOFSEN können **Produktentwicklungsprozesse** nicht in die herkömmlichen Strukturierungsschemata eingeordnet werden, da sie eine hohe Komplexität, einen mittleren Detaillierungsgrad, hohe Arbeitsteilung, hohe Interprozessverflechtung, hohe Dynamik sowie einen hohen individuellen Anteil sowie geringe (bis keine) Wiederholbarkeit aufweisen. Aus diesem Grund können sie auch nicht mit den klassischen Methoden für Geschäftsprozesse unterstützt werden [ROELOFSEN 2011, S.17]. Ebenso weist WERTH darauf hin, dass Entwicklungsprozesse gegenüber „konventionellen“ Geschäftsprozessen spezifische Merkmale aufweisen. Geschäftsprozesse werden als deterministisch und geschlossen charakterisiert, da sämtliche Attribute bekannt sind und somit ein zuverlässiger Prozessentwurf sowie dessen Umsetzung in die betriebliche Realität erfolgen können. Entwicklungsprozesse gehören zu den offenen Prozessen, da sie über zahlreiche variable Faktoren verfügen und somit nur ein vorläufiger Prozessentwurf möglich ist. Diese Faktoren werden im Prozessverlauf exploriert, so dass die „Prozessentdeckung“ ein Teil der Prozessdurchführung darstellt. Diese Eigenschaften führen

zu einer erschwerten Unterstützung im Vergleich zu deterministischen, geschlossenen Prozessen [WERTH 2007, S.32F]. Ein Vergleich der charakteristischen Eigenschaften von Entwicklungs- und Geschäftsprozessen ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Unterscheidung von Entwicklungs- und Geschäftsprozessen [nach VAJNA 2005, S.371]

Entwicklungsprozesse	Geschäftsprozesse
Prozesse sind hochdynamisch, kreativ und enthalten viele Iterationen und Rücksprünge	Prozesse sind wohldefiniert, starr, reproduzier- und prüfbar und unterliegen keinen Änderungen
Prozessergebnisse sind nicht determinierbar	Prozessergebnisse sind determinierbar
Objekte, Konzepte, Ideen, Entwürfe, Ansätze, Versuche (und Fehler) sind virtuell und nicht immer präzise	Materiealien, Technologien und Werkzeuge sind physisch (z.B. Produktion) und/oder vollständig beschrieben (z.B. Controlling)
Wahrscheinlichkeit von Störungen ist hoch, z. B. aufgrund ungeplanter Ereignisse, Änderungen, etc.	Die Wahrscheinlichkeit von Störungen oder unvorhergesehenen Ereignissen ist gering
hohe Anforderungen an dynamische Prozesssteuerung	geringe Anforderungen an dynamische Prozesssteuerung
<b>Prozessnavigation</b>	<b>Prozesssteuerung</b>

In Produktentwicklungsprozessen wird das zu entwickelnde System zunehmend detailliert und konkretisiert und somit Wissen über das prozessprägende Objekt (in diesem Fall das Produkt) erzeugt [vgl. KREIMEYER 2010, S.64]. Die Produktentwicklung ist somit eng mit der Problemlösung verknüpft [LINDEMANN 2009, S.45FF]. Die ablaufenden Prozesse sind geprägt durch die vorherrschenden Randbedingungen und weisen dementsprechend einen hohen Neuigkeitsgrad auf. Es sind häufig weder der gewünschte Zielzustand noch das Vorgehen zu dessen Erreichung eindeutig oder vollständig definiert. Zudem unterliegen Ziele und Randbedingungen des Prozesses dynamischen Veränderungen [BAUMBERGER 2007, S.133]. Da die Merkmale und Eigenschaften des zukünftigen Systems zu Beginn des Prozesses nicht feststehen sondern durch die getroffenen Entscheidungen zunehmend festgelegt werden, sind Entwicklungsprozesse stets mit Unsicherheit verbunden die erst im Prozessverlauf geringer wird [LÉVÁRDY & BROWNING 2009, S.603]. Sie weisen daher ein schrittweises und iterativ geprägtes Vorgehen auf, das permanent zwischen Analyse, Synthese und Entscheidung wechselt [EHRENSPIEL 2006, S.245]. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie die erzeugten (Zwischen-) Ergebnisse bestimmen über das weitere Vorgehen im Prozess [VAJNA 2005, S.371]. Die Konkretisierung erfolgt dabei zumeist nicht linear, sondern in Form von **Iterationen**, in denen der Entwurf überarbeitet, verbessert oder detailliert wird [vgl. WYNN et al. 2007; LANGER et al. 2011]. Diese Iterationen laufen zudem nicht streng zyklisch ab, sondern treten auch als vorwärts und rückwärts gerichtete Sprünge auf und enthalten Wechsel zwischen den Konkretisierungsebenen [BADKE-SCHAUB & GEHRLICHER 2003]. Dennoch sind in ihrem Verhalten bestimmte Muster identifizierbar, die sich aus den Abhängigkeiten zwischen Organisation, Produktarchitektur sowie dem Prozess selbst ergeben [EPPINGER & SALMINEN 2001].

In Konsequenz sind Entwicklungsprozesse nur sehr schlecht strukturierbar und entfalten sich erst dynamisch in ihrem Verlauf [LINDEMANN 2009, S.17]. Dies führt zu einer schwierigen Modellier- und Planbarkeit, die durch die niedrige Wiederholbarkeit aufgrund ständig veränderter Randbedingungen weiter verstärkt wird [VAJNA 2005, S.371]. Der exakter Ablauf sowie (Zwischen-)Ergebnisse und Zeitbedarf lassen sich nicht präzise vorherbestimmen, wes-

halb Methoden und Werkzeuge benötigt werden, die der hohen Dynamik gerecht werden [vgl. LINDEMANN 2009, S.17]. Aus diesem Grund wird meist eine rollierende Prozessplanung vorgenommen, bei der ausgehend von einem übergeordneten Vorgehensplan zunächst Teilziele abgeleitet und diese in Abhängigkeit der gewonnen Erkenntnisse und Ergebnisse einer Anpassung bzw. Detaillierung unterzogen werden [BAUMBERGER 2007, S.134].

Die **Prozessplanung** kann nach [PLATZ & SCHMELZER 1986, S.131] als „*systematische Informationsgewinnung über den zukünftigen Ablauf des Projektes und die gedankliche Vorwegnahme des notwendigen Handelns im Projekt*“ aufgefasst werden, in der sämtliche zur Erreichung des Ziels erforderlichen Aktivitäten ermittelt werden. Sie ermöglicht ein frühzeitiges Reagieren bei Störungen oder sonstigen Abweichungen im Prozessverlauf, da Abweichungen nur durch Vergleich mit einem Plan feststellbar sind [LINDEMANN 2009, S.19]. Die Prozessplanung umfasst nach [OTTO & WOOD 2001, S.75] die Festlegung welche Arbeitsschritte auszuführen sind (what), wann diese ausgeführt werden (when), wo dies geschieht (where) und welche Ressourcen dafür eingesetzt werden (how). Der Planungsprozess kann in die Phasen **Zielplanung**, in der ausgehend von der Zielsetzung die zu erreichenden Soll Daten festgelegt werden, sowie **Ablauf- bzw. Vorgehensplanung** untergliedert werden, in der die erforderlichen Tätigkeiten sowie deren Reihenfolge beschrieben werden [BAUMBERGER 2007, S.143]. Aus systemtechnischer Sicht (siehe Kap. 3.2.1) werden somit durch die Planung das Ziel- und das Handlungssystem beschrieben. Die Detaillierung der Planung kann allgemein auf Ebene des Gesamtprojektes (Meilensteine), der strategischen Planung (abstrakt Teilprojekte und Phasen), der operativen Planung (konkrete Arbeitsschritte) sowie auf Ergebnisebene (definierte Zwischenergebnisse) durchgeführt werden [LINDEMANN 2009, S.34&38]. Analog zur Prozessmodellierung kann auch hier zwischen präskriptiven und deskriptiven Plänen unterschieden werden.

Die Planung von Produktentwicklungsprozessen unterscheidet sich aufgrund ihrer hohen Dynamik und geringer Determinierbarkeit (siehe Kap. 3.4.1) von der anderer Geschäftsprozesse. Aufgrund dieser Eigenschaften sowie den typischerweise auftretenden Iterationen, die zudem kaum vorhersehbar sind, ist eine detaillierte und vollständige Planung nur schwer bzw. kaum möglich (vgl.[ULRICH & EPPINGER 2003; ECKERT & CLARKSON 2010]). In Konsequenz muss daher entweder auf Vollständigkeit oder Detaillierung verzichtet werden (vgl. [BAUMBERGER 2007, S.143]). Daher unterscheidet [EVERSHEIM 1995, S.20F] zwischen ergebnisorientierter und abwicklungsorientierter Prozessplanung. In der **ergebnisorientierten Prozessplanung** werden Zwischenergebnisse definiert und die Prozesse zu deren Erstellung nur auf einem relativ geringen Detaillierungsgrad beschrieben. Sie eignet sich für komplexe Neuentwicklungen, bei denen zu Beginn nur wenige Informationen vorhanden sind. In der **abwicklungsorientierten Prozessplanung** erfolgen hingegen eine detaillierte Beschreibung sowie eine genaue Abstimmung der Prozesse. Sie kann daher beispielsweise für Auftrags- oder Anpassungsentwicklungen, die eine gewisse Wiederholbarkeit sowie ähnliche Abläufe aufweisen eingesetzt werden. Ein Ansatz zur Auflösung des Konfliktes liegt in der Erzeugung von Vollständigkeit auf einer abstrakten Ebene (Meilensteine, entspricht ergebnisorientierter Planung) und der schrittweisen Anpassung und Detaillierung der Planung im Prozessverlauf parallel zur Ausführung [BICHLMAIER 2000, S.50]. Daher stellt DEMERS fest, dass sich gut und schlecht determinierbare Prozesse nicht in der Planbarkeit an sich, sondern im dafür sinnvollen Zeitpunkt unterscheiden. Deterministische Geschäftsprozesse sind daher im Voraus voll-

ständig planbar, während nicht deterministischer Entwicklungsprozesse erst während der Ausführung für kleinerer Zeitabschnitte geplant werden können [DEMERS 2000, S.30].

In ihren **Untersuchungen in der Industrie** stellen [ECKERT & CLARKSON 2010, S.161] fest, dass die Planung von Zeit und Ressourcen bei zentralen Teilsystemen und Komponenten häufig ausgehend von „major-long-lead-time items“ sowie den Test- und Integrationszeitpunkten vorgenommen wird. Hieraus wird ein „major task plan“ abgeleitet an den die Ressourcenplanung angeknüpft wird. Dieser bleibt jedoch relativ flexibel, so dass Aufgaben und Ressourcen ausgetauscht oder zeitlich verschoben werden können. Sie stellen weiterhin fest, dass detaillierte Pläne mit spezifischen Tätigkeiten und Ressourcen meist nur für einige Wochen im Voraus geplant werden.

Die in der Prozessplanung erstellten (zumeist präskriptiven) Pläne können mit unterschiedlichen Prozessmodellen (siehe Kap. 3.4.3) modelliert werden. Diese bilden einen ordnenden und unterstützenden Rahmen für die Bearbeitung der Aufgaben und unterstützen dadurch die Beteiligten im Prozessverlauf [BENEKE 2003, S.165]. Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung simulierbarer Prozessmodelle, um daraus Informationen für die Planung und Strukturierung des Prozesses ableiten zu können [VOIGTSBERGER 2005; WYNN & CLARKSON 2009; LÉVÁRDY & BROWNING 2009; KARNIEL & REICH 2009]. Da in dieser Arbeit eine Unterstützung der mechatronischer Entwicklungsprozesse aus struktureller Sicht vorgenommen wird, ist die spezifische Art der Modellierung nicht ausschlaggebend, solange die erforderlichen strukturellen Informationen extrahiert werden können.

Zur Unterstützung der Prozessplanung kann auf generische oder unternehmensspezifische Entwicklungsprozessmodelle zurückgegriffen werden (Bild 3-23, Prozessmodellierung siehe Kap. 3.4.3). Sie sind meist in Form von Wissensbasen hinterlegt und werden abhängig von der vorliegenden Problemstellung sowie weiteren Randbedingungen angepasst und als Ausgangspunkt für die Planung verwendet. Für mechatronische Produktentwicklungen existieren verschiedene auf generischen oder wissensbasierten Modellen basierende Ansätze [z. B. GAUSEMEIER et al. 2005, REDENIUS 2006, MEERKAMM et al. 2009], die sich in ihrem Fokus und ihrer Planungstiefe unterscheiden. Eine detailliertere Betrachtung erfolgt in Kap. 3.5.

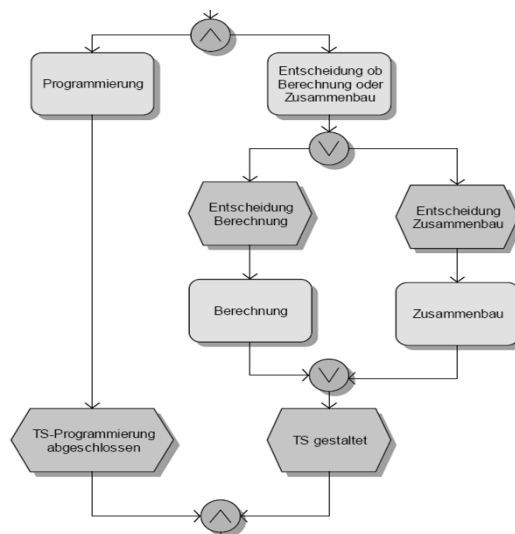


Bild 3-23: Ausschnitt eines Prozessmodells zur Mechatronikentwicklung in ARIS [MEERKAMM et al. 2009, S.32]

Aufgrund der zentralen Stellung der Prozesse in einem Unternehmen, kommt auch ihrem Management eine besondere Bedeutung zu. Nach [SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.2] ist das **Prozessmanagement** ein geeignetes Konzept, flexibel auf gesteigerte Anforderungen hinsichtlich Zeit, Qualität, Kosten und Flexibilität reagieren zu können. Es existiert keine einheitliche Definition bzw. Verständnis von Prozessmanagement, sondern es werden spezifische Sichtweisen und Aspekte betont. So dient nach [BECKER et al. 2008, S.8] das Prozessmanagement der Planung, Steuerung und Kontrolle von inner- und überbetrieblichen Prozessen. Nach [SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.4F] wird darunter „*ein integriertes Konzept von Führung, Organisation und Controlling verstanden, das eine zielgerichtete Steuerung der Geschäftsprozesse ermöglicht. Es ist auf die Erfüllung der Bedürfnisse der Kunden und anderer Interessensgruppen (Mitarbeiter, Kapitalgeber, Eigentümer, Lieferanten, Partner, Gesellschaft) ausgerichtet*“. Es bezieht dabei die strategischen Ziele des Unternehmens mit ein und ist Grundlage für Anforderungen an Informations- und Kommunikationssysteme [SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.7].

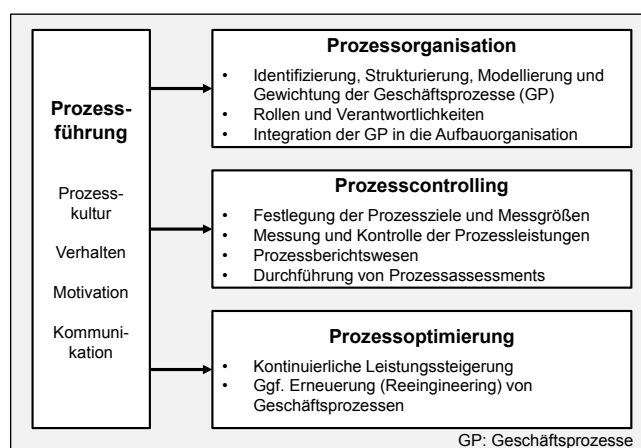


Bild 3-24: Aufgabenfelder des Prozessmanagements [nach SCHMELZER & SESSELMANN 2008, S.8]

Nach obigem Verständnis umfasst das Prozessmanagement nach SCHMELZER & SESSELMANN die Bereiche Prozessführung, Prozessorganisation, Prozesscontrolling und Prozessoptimierung (siehe Bild 3-24), die kontinuierlich ablaufen und so zu einer stetigen Verbesserung beitragen. Analog hierzu definiert ALLWEYER einen „Geschäftsprozessmanagement-Kreislauf“, der in die vier Phasen strategisches Prozessmanagement, Prozessentwurf, Prozessimplementierung sowie Prozesscontrolling untergliedert ist [ALLWEYER 2005, S.89FF] (siehe Bild 3-25). Bei [STÖGER 2009, S.30] sowie [BECKER et al. 2008, S.310] finden sich ähnliche Konzepte, in denen die Phasen Beurteilung der Ausgangslage, Prozesserhebung und Prozessmessung, Prozessgestaltung, Prozessumsetzung, Prüfung der Wirksamkeit zyklisch durchlaufen werden. Es kann weiterhin zwischen kontinuierlichen/inkrementellen und radikalen Ansätzen des Prozessmanagements, wie dem Business Process Reengineering nach [HAMMER & CHAMPY 1993], unterschieden werden [GAITANIDES et al. 1994, S.11; BECKER ET AL. 2008, S.299F]. BECKER ET AL. stellen dabei fest, dass einmalige Veränderungen ohne kontinuierliche, systematische Weiterentwicklung und Verbesserungen aufgrund sich ständig ändernder Randbedingungen nicht sinnvoll sind.

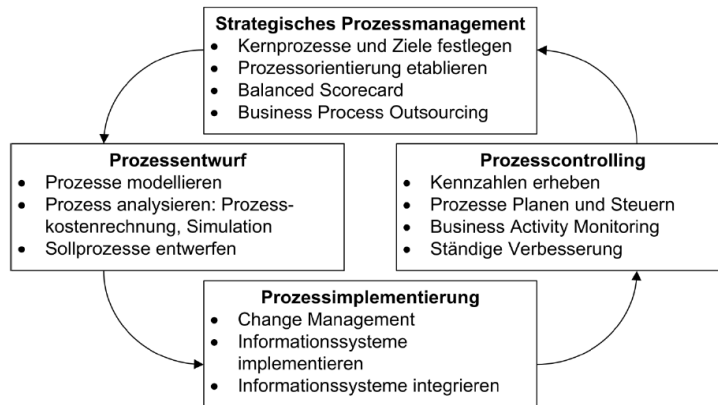


Bild 3-25: Der Geschäftsmanagementkreislauf [nach ALLWEYER 2005, S.91]

Probleme im Zusammenhang mit dem Prozessmanagement sind nach ROELOFSEN häufig darauf zurückzuführen, dass es mit dem Reengineering oder der Prozessmodellierung gleichgesetzt wird. Der radikale Reengineering-Ansatz ist in Unternehmen häufig negativ besetzt, während die Reduzierung auf reine Modellierung und Visualisierung zu kurz greift um einem wirklichen Management gerecht zu werden [ROELOFSEN 2011, S.14]. Ein erfolgreiches Prozessmanagement ist nach [STÖGER 2009, S.2F] durch die Faktoren Resultatorientierung, Kundenorientierung, Beitrag ans Ganze, Kontrollierbarkeit/Messbarkeit/Beurteilbarkeit, Wiederholbarkeit, Verantwortlichkeit sowie Führbarkeit gekennzeichnet.

Eine häufige Zielsetzung von Unternehmen besteht in der Verkürzung von Entwicklungszeiten zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Hierfür kommen häufig Simultaneous und Concurrent Engineering Ansätze zur Anwendung, die durch den umfassenden Einsatz von rechnerbasierten Methoden und Werkzeugen (CAX) zur Unterstützung der Produktentwicklung ermöglicht werden [vgl. GAUSEMEIER et al. 2006, S.223]. Hierbei ist unter **Simultaneous Engineering** die Parallelisierung und zeitgleiche Bearbeitung von Tätigkeiten zu verstehen, die bisher sequentiell bearbeitet wurden (z. B. die Entwicklung von Produkt und zugehörigem Produktionssystem), während unter **Concurrent Engineering** die Parallelisierung von prinzipiell gleichen Prozessschritten (z. B. Zerlegung der Entwicklungsaufgabe) zu verstehen ist [PFEIFER-SILBERBACH 2005, S.2].

Die Umsetzung dieser Ansätze sowie die Realisierung einer durchgängigen **rechnerbasierten Unterstützung** von Produktentwicklungsprozessen ist ohne ein Produktdatenmanagement nicht möglich [GAUSEMEIER et al. 2006, S.224F]. Das **Produktdatenmanagement (PDM)** umfasst die Verwaltung, Organisation und Steuerung von manuell oder rechnergestützt erzeugten Daten und Informationen in allen Phasen des Produktlebenszyklus [KLEINER 2003, S.43]. Es wird daher auch von **Produkt-Lifecycle-Management (PLM)** gesprochen. Zielsetzung ist die Schaffung einer durchgängigen Prozesskette zur flexiblen Vorgangssteuerung in der Produktentstehung, damit die benötigten Informationen zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, in der richtigen Qualität und für die richtige Person bereitgestellt werden (siehe z. B.

[EIGNER & STELZER 2009]). Zur rechnerbasierten Prozessunterstützung können **Workflow-managementsysteme**<sup>41</sup> (WFMS) eingesetzt werden. Diese sind definiert als *“a system that defines, creates and manages the execution of workflows through the use of software, running on one or more workflow engines, which is able to interpret the process definition, interact with workflow participants and, where required, invoke the use of IT tools and applications”* [WMC 1999, S.9]. Sie dienen somit der automatischen Vorgangsbearbeitung und sorgen für die automatisierte Weiterleitung von Aufgaben etc. in Form elektronischer Vorgangsmappen, die der Bearbeiter direkt zur Verfügung gestellt bekommt [ALLWEYER 2005, S.30F]. Dies erfordert eine exakte Beschreibung des Prozesses, weshalb sie nur für einen Teil der Geschäftsprozesse geeignet sind [LEHMANN 2008, S.14F]. In der Produktentwicklung sind Workflow-managementsysteme zumeist als Bestandteil von PDM bzw. PLM-Systemen vorhanden [vgl. PFEIFER-SILBERBACH 2005, S.36; GAUSEMEIER et al. 2006, S.244]. Zur Unterstützung von Entwicklungsprozessen sind die aktuellen Systeme aufgrund der schlechten Strukturierbarkeit der Prozesse nicht ausreichend geeignet [ROELOFSEN 2011, S.56]. Ihre Hauptaufgaben liegen daher im Bereich des Änderungs- (Engineering Change) und Freigabemanagements [PFEIFER-SILBERBACH 2005, S.38].

### 3.4.3 Modellierung und Analyse von Entwicklungsprozessen

Die Modellierung von Prozessen nimmt bei deren Analyse und Optimierung eine zentrale Rolle ein. Nach [BROWNING et al. 2006, S.109] bildet die **Prozessmodellierung** die Grundlage des Prozessmanagements. Eine hierbei häufig angeführte Zielsetzung ist die „Verbesserung“ bzw. „Optimierung“ der Prozesse, wobei kein einheitliches Verständnis existiert, was darunter zu verstehen ist. Die unterschiedlichen Prozessmanagementansätze zielen auf unterschiedlichen Anwendungs- und Problemfelder (Transparenz, Qualität, Flexibilität, Schnittstellen, etc.) sowie Interessensgruppen ab (einen Vergleich zeigt [KREIMEYER 2010, S.68F]).

Entsprechend den vielfältigen Zielsetzungen im Prozessmanagement existieren unterschiedlichen Sichten auf Prozesse, in denen jeweils unterschiedliche Aspekte relevant sind (z. B. Informationsflüsse, Arbeitsablauf, Verantwortlichkeiten). Prozessmodelle können somit für unterschiedlichste Verwendungszwecke erstellt werden und sollten entsprechend ihres Modellierungszwecks eingesetzt werden (siehe Bild 3-26) [BROWNING & RAMASESH 2007]. Für eine zielgerichtete Modellierung sollte der Modellierungszweck zu Beginn spezifiziert und eine dementsprechende Repräsentation gewählt werden [BECKER et al. 2008, S. 50F].

---

<sup>41</sup> Unter einem Workflow ist *“the automation of a business process, in whole or part, during which documents, information or tasks are passed from one participant to another for action, according to a set of procedural rules”* zu verstehen [WMC 1999, S.8].

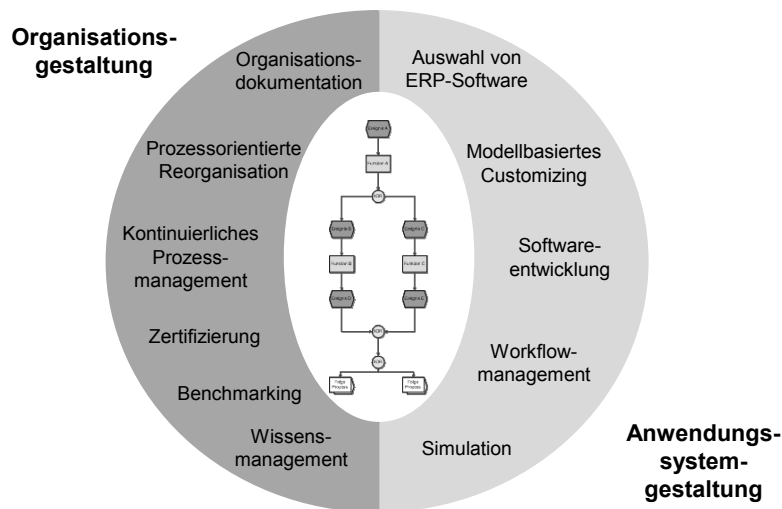


Bild 3-26: Unterschiedliche Verwendungszwecke von Prozessmodellen [nach BECKER et al. 2008, S.57]

Es existiert eine umfangreiche Anzahl von Ansätzen, Methoden und Werkzeugen zur Modellierung und Darstellung von Prozessen. Diese besitzen jeweils spezifische Stärken und Schwächen und sind auf bestimmte Anwendungsgebiete ausgerichtet. Dabei kann nach HUPE grundlegend zwischen deskriptiven und präskriptiven Prozessmodellen unterschieden werden. In **präskriptiven Modellen** wird der Prozessablauf vorgeschrieben, wobei die Bandbreite von „schwach strukturiert“ bis „präzise vorbestimmt“ reicht. Hierdurch wird eine Plan- und Messbarkeit des Prozesses erreicht, die Modelle sind jedoch unflexibler bei (unvorhergesehen) Änderungen. In **deskriptiven Modellen** wird hingegen ein laufender oder bereits abgeschlossener Prozess dargestellt. Sie dienen damit primär zur Analyse und sind für die Planung nur bedingt einsetzbar [HUPE 2009, S.12].

Aufgrund der Vielzahl vorhandener Modelle wird an dieser Stelle keine umfassende Darstellung der verschiedenen Ansätze vorgenommen. Es kann zwischen *aktivitätsorientierten*, *produktorientierten* und *entscheidungsorientierten* Modellen unterschieden werden [BENABDELLATIF 2002]. Eine Übersicht von Prozessmodellen ist beispielsweise bei [BROWNING et al. 2006], [BAUMBERGER 2007; S.140FF], [WYNN 2007, S.60]; [BURGHARDT 2008, S.245FF]; [BROWNING 2009] oder [KO et al. 2009] zu finden. Speziell mit „netzwerkartigen“ Modellen befassen sich [BROWNING & RAMASESH 2007] und stellen fest, dass in sämtlichen Modellen die Relationen zwischen den Arbeitsschritten sowie deren Auswirkungen adressiert werden. Vor diesem Hintergrund schlagen BROWNING ET AL. ein „General Framework“ für Prozessmodelle vor, in dem zusätzlich zu den Basiskomponenten Prozessschritte und Relationen (über Input/Output) weitere Informationen über Organisationseinheiten, Werkzeuge, Produktbestandteile sowie Ziele abgebildet sein sollen. Auf Grundlage des Frameworks sollen über eine Filterung nach Attributen, ausgehend von einer gemeinsamen Datenbasis, anwendungsspezifische Prozessmodelle abgeleitet werden. Die **strukturellen Aspekte** unterschiedlicher Prozessmodellen betrachtet [KREIMEYER 2010] und zeigt einen Ansatz zu deren Modellierung mit Hilfe von Multiple-Domain Matrizen (MDM, siehe Kap. 3.3.2). Eine Übersicht häufig eingesetzter Modellierungsmethoden zeigt Tabelle 3-2.



Tabelle 3-2: Übersicht häufig verwendeter Prozessmodellierungsmethoden [nach KREIMEYER 2010, S.73]

Prozessmodellierungsmethode	Akronym
Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten	eEPK
Objektorientierte Ereignisgesteuerte Prozessketten	oEPK
Integrierte Unternehmensmodellierung	IUM
Unified Modeling Language	UML
Structured Analysis and Design Technique	SADT
Integrated Definition Method	IDEF0 / IDEF3
Business Process Model and Notation	BPMN
Yet Another Workflow Language	YAWL
P3 Signposting	
Petri-Netze	
Entwicklungsprozessbausteine	
Program/Project Evaluation and Review Technique	PERT
Objektorientierte Methode für die Geschäftsprozessmodellierung und -analyse	OMEGA

In der Literatur zum Prozessmanagement ist zudem häufig der Begriff „Netzplantechnik“ bzw. „Network Scheduling Techniques“ zu finden. Darunter ist keine spezielle Modellierung zu verstehen, stattdessen handelt es sich um einen Überbegriff für Methoden, die Netzwerkstrukturen zur Repräsentation verwenden und auf der Graphentheorie basieren (z. B. CPM, PERT oder DSM) [vgl. KERZNER 2009, S.493F; HABERFELLNER et al. 2012, S.177]. Die Elemente des Netzwerks sind hierbei Vorgänge (zeitforderndes Geschehen), Ereignisse (definierter Zustand) sowie Relationen (personell, fachlich, terminlich) [BURGHARDT 2008, S.246]. Neben der Verwendung von Netzstrukturen werden zur grafischen Visualisierung häufig auch Balkenpläne (Ganttcharts) zur Terminplanung bzw. zur Abbildung der zeitlichen Aspekte eingesetzt (vgl. [BURGHARDT 2008, S.266FF]).

Die dargestellten Methoden ermöglichen die Modellierung von Prozessen auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen. Ein zentraler Punkt ist die Wahl der geeigneten **Granularität**, die abhängig vom betrachtenden Modellierungszweck (Zielsetzung) sowie weiteren Randbedingungen ist und nicht allgemein festgelegt werden kann. Entsprechend besitzen die in Kap. 3.1.4 betrachteten Vorgehensmodelle zur Mechatronikentwicklung auf Gesamtprozessebene einen deutlich höheren Abstraktionsgrad, als dies ein Modell zur Analyse von Iterationen auf Handlungsebene erfordert. Ein entscheidender Einfluss auf den **Detaillierungsgrad** ergibt sich nach BAUMBERGER aus der engen Beziehung von Produkt- und Prozessstruktur, da die Elemente der Produktstruktur über die Aktivitäten des Prozesses manipuliert werden. Ein geeignetes Granularitätslevel liegt somit in dem Bereich, in dem sinnvolle Bezüge zwischen Produkt- und Prozessstruktur hergestellt werden können. Zudem ist der Detaillierungsgrad aufgrund der nicht beherrschbaren Komplexität beschränkt [BAUMBERGER 2007, S.132].

Die **Analyse von Prozessen** kann analog zum Prozessmanagement mit unterschiedlichen Zielsetzungen erfolgen. Zur Systematisierung von Prozessmodellen und der Zielsetzung der Analyse verwendet [WYNN 2007, S.60] ein generisches Rahmenwerk mit mehreren Ebenen. Die einzelnen Klassen repräsentieren darin einen bestimmten Blickwinkel auf den Prozess, in denen unterschiedliche Modelle und Zielsetzungen zum Einsatz kommen können.

[KREIMEYER 2010, S.77] merkt an, dass die Prozessstruktur nur implizit in den analytischen Ansätzen über die Betrachtung von Aktivitäts-, Informations- oder Akteursnetzwerken adressiert wird. Aufgrund der Vielzahl wird im Folgenden lediglich eine Auswahl von mit dem Themengebiet dieser Arbeit verwandter Ansätze gezeigt, die einen Eindruck vermitteln soll und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Die strukturelle Analyse von Abhängigkeiten zwischen Prozessaktivitäten unter Verwendung der DSM (siehe Kap. 3.3.3) zur Optimierung von Reihenfolge, Synchronisation oder Kommunikation findet sich bei [EPPINGER et al. 1994; KUSIAK 1999; BROWNING 2000; AUSTIN et al. 2002]. Der Einfluss der Prozessarchitektur auf Prozesskosten und -dauer wird bei [BROWNING & EPPINGER 2002] betrachtet. Weiterhin können Modelle mit mehreren Domänen zur Analyse von Abhängigkeiten zwischen Entwicklungsprozess und Produktstruktur sowie einer dementsprechenden Gestaltung des Prozessablaufs genutzt werden [EPPINGER & SALMINEN 2001; SOSA et al. 2004; DANILOVIC & BROWNING 2007; GOKPINAR et al. 2010]. Die Ableitung von funktionsabprüfenden Test auf Basis der Produktarchitektur sowie unter Berücksichtigung von indirekten Abhängigkeiten findet sich bei [MOCKO et al. 2007]. Es werden darin jedoch nicht die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen mechatronischer Entwicklungsprozesse berücksichtigt. Einen generischen Ansatz zur Modellierung von Strukturinformationen aus Prozessmodellen sowie den Einsatz struktureller Kennzahlen und Metriken zu deren Analyse zeigt [KREIMEYER 2010]. Solche Kennzahlen können beispielsweise zur automatisierten Ableitung von Kommunikations- und Koordinationstätigkeiten [CATALDO et al. 2006] genutzt werden.

Ein wichtiges Anwendungsfeld in der Prozessanalyse ist der Umgang mit Zyklen und **Iterationen**, die aus der inhärenten Unsicherheit resultieren und eine wesentliche Eigenschaft darstellen. Die Identifikation, Behandlung und Vermeidung von Iterationen stellt eine häufige Zielsetzung dar, ist jedoch gleichzeitig eine wesentliche Herausforderung in der Modellierung. Es existieren folglich Ansätze zur Beschreibung und Charakterisierung von Iterationen in Entwicklungsprozessen [BADKE-SCHAUB & GEHRLICHER 2003; WYNN et al. 2007; LANGER et al. 2010]. Auf struktureller Ebene können MDMs zur Reduktion von Verschwendung im Rahmen des Lean Development [ELEZI et al. 2011] sowie zum Management von Anforderungsänderungen [KORTLER et al. 2010] genutzt werden. Weiterhin existieren Ansätze, in denen die Zustände, Aktivitäten und Relationen des Prozesses detaillierter beschrieben werden, beispielsweise durch die Modellierung von Zeitdauern [KRAUSE et al. 2004], Handlungs- bzw. Entscheidungsszenarios [WYNN 2007] oder Regeln zur Verknüpfung von Aktivitäten [LÉVÁRDY & BROWNING 2009]. Diese Modelle ermöglichen zumeist eine Simulation des Prozesses und können unter anderem zur Untersuchung von Robustheit und Unsicherheit [CHALUPNIK et al. 2009] oder zur Prozessplanung [VOIGTSBERGER 2005; WYNN & CLARKSON 2009] verwendet werden. Einen Überblick von DSM-basierten Ansätzen zur Prozesssimulation zeigen [KARNIEL & REICH 2009].

Mit der Betrachtung von Iterationen eng verknüpft ist das **Änderungsmanagement** (Change Management), da Änderungen häufig innerhalb von Iterationen ausgelöst werden bzw. zu Iterationen im Prozess führen. Nach KÖHLER kann zwischen Änderungen in der Organisation sowie am Produkt unterschieden werden: *„Organisatorische Änderungen dienen der unternehmensbezogenen Veränderung und Entwicklung und sind Änderungen der Ablauf- und*

*Aufbauorganisation*<sup>42</sup>. Im Vergleich dazu sind technische Produktänderungen „*technische Änderungen, welche auf Änderungen an den Zuständen von Produkten und deren Dokumentation beziehungsweise Datenbasis beschränkt sind. Technische Produktänderungen bedingen in der Regel weitere technische Änderungen*“ [KÖHLER 2009, S.7&S.11]. Die Änderungen laufen selbst wieder in Prozessen ab, die ebenfalls methodisch unterstützt werden können [KLEEDÖRFER 1999]. Eine systemtechnische Modellierung zur Beschreibung von Änderungsauslösern und deren Auswirkungen in Entwicklungsprozessen zeigen [LANGER et al. 2011]. Die Analyse und Vorhersage von Änderungsauswirkungen (Change Propagation) kann unter Betrachtung der Bauteilstruktur [CLARKSON et al. 2004], der Produkteigenschaften [KÖHLER 2009] oder der Entwurfparameter [ROUIBAH & CASKEY 2003] erfolgen. Einen Ansatz zur Visualisierung von Änderungsauswirkungen zeigen [KELLER et al. 2005]. Die kombinierte Betrachtung von Produkt und Prozess sowie die Abschätzung von Änderungsaufwand und -kosten findet sich bei [JANIA 2004]. Für einen tieferen Einblick in das Themengebiet sowie einen Literaturüberblick wird an dieser Stelle auf [JARRATT et al. 2010] sowie [AHMAD et al. 2011] verwiesen.

### 3.5 Ansätze zur Unterstützung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit in der Mechatronik

Zum Abschluss des Kapitels erfolgt eine Betrachtung relevanter, bestehender Ansätze zur Unterstützung mechatronischer Entwicklungsprozesse. Hierbei sind für diese Arbeit in erster Linie die Unterstützung des Vorgehens (präskriptive Planungsaspekt) sowie die Förderung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit (transdisziplinäre Synchronisation) von Interesse.

Aufgrund der Bedeutung der Thematik existiert in der Literatur eine fast unüberschaubare Vielzahl von Ansätzen, die sich mit der Unterstützung mechatronischer Entwicklungen befassen. Diese Ansätze lassen sich in die Bereiche der *Unterstützung der Produktgestaltung* (technisches System an sich), *Unterstützung der Prozessgestaltung* (Entwicklungs- und Geschäftsprozesse) sowie speziell auf die *Mechatronik angepasste PDM/PLM-Systeme* unterscheiden. Weiterhin existieren *integrative Ansätze*, in denen sowohl Produkt als auch Prozess sowie deren Abhängigkeiten gemeinsam betrachtet werden. In der letztgenannten Gruppe ist zumeist auch eine Unterstützung durch PDM/PLM-Systeme vorgesehen. Im Folgenden werden einige Ansätze aus den verschiedenen Gruppen vorgestellt sowie auf ihre Charakteristika eingegangen. Neben der Unterstützung des Vorgehens und der Synchronisation sind weiterhin der zeitliche Schwerpunkt des Ansatzes (Phase im Prozess), die Betrachtung domänenübergreifender Änderungsabhängigkeiten sowie die integrative Betrachtung von Produkt und Prozess von Interesse. Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, es soll lediglich ein Überblick vermittelt werden.

---

<sup>42</sup> Die Aufbauorganisation umfasst die horizontale und vertikale Zerlegung komplexer Aufgaben, die Zuweisung abgegrenzter Aufgabenkomplexe auf organisatorische Einheiten (Stellenbildung) sowie die Gestaltung von Weisungs- und Kommunikationsbeziehungen zwischen Einheiten. Sie schafft somit eine statische, organisatorische Infrastruktur für die im Unternehmen ablaufenden Prozesse. Die Ablauforganisation umfasst die Kombination von Arbeitsschritten zur komplexen (Geschäfts-)Prozessen sowie die prozessinterne – und übergreifende Harmonisierung in zeitlicher und räumlicher Hinsicht [nach FRESE & HORVATH 1996].

Die Ansätze zur **Unterstützung der Produktgestaltung** stellen das technische System in den Mittelpunkt. Die transdisziplinäre Zusammenarbeit wird zumeist über eine modellbasierte Entwicklung erreicht, in der die unterschiedlichen Disziplinen an einem gemeinsamen Modell des Systems arbeiten. Dieses ist dabei so ausgeprägt, dass es die unterschiedlichen Aspekte und Anforderungen der Disziplinen abdeckt. Durch die Arbeit an gemeinsamen Modellen wird eine Zusammenarbeit der Domänen sowie die Betrachtung von Änderungsabhängigkeiten erreicht. Diese Ansätze werden daher häufig in der Phase des domänenübergreifenden Systementwurfs eingesetzt. So verwendet die am Heinz Nixdorf Institut (HNI) der Universität Paderborn entwickelte Spezifikationstechnik eine Reihe von vernetzten Partialmodellen zur disziplinübergreifenden Beschreibung des mechatronischen Produktkonzeptes [GAUSEMEIER et al. 2009a; GAUSEMEIER et al. 2010; ANACKER et al. 2011]. Diese bilden den Ausgangspunkt für den domänenspezifischen Entwurf, wobei hier ebenfalls Ansätze zur Konsistenthaltung der Abhängigkeiten zwischen den Domänen existieren [GAUSEMEIER et al. 2009c]. Einen auf der FBS-Modellierung<sup>43</sup> basierenden Ansatz zur Unterstützung der Systemarchitekturentwicklung zeigen [KOMOTO & TOMIYAMA 2010]. Daneben finden sich Ansätze, die sich mit der durchgehenden funktionsorientierten Betrachtung des technischen Systems befassen. So zeigt [WARKENTIN 2010] die funktionsorientierte Modellierung von Elektrik/Elektronik-Systemen über den gesamten Lebenslauf sowie eine Methodik zur bedarfsgerechten Erstellung dieser Produktmodelle. [FELGEN 2007] nutzt ein relationsorientiertes Funktionsmodell zur Qualitätssicherung, mit dem er in frühen Phasen die Identifikation domänenübergreifender Wirkketten als Ursachen von Fehlern sowie die Ableitung von Absicherungsmaßnahmen unterstützt. Zur Beschreibung der Abhängigkeiten von Funktionen und Bauteilen verwendet er einen matrixbasierten Ansatz (DSM/DMM).

Die Entwicklung von Systemen mit Speicherprogrammierbaren Steuergeräten (SPS) betrachtet [BATHELT 2006], wozu er ein erweitertes Funktionsmodell sowie ein entsprechendes Tool entwickelt. Einen Ansatz zur objektorientierten Funktionsmodellierung sowie zur parallelen Detaillierung von Funktionen, Objekten (Komponenten) sowie deren Relationen findet sich bei [WU et al. 2009]. Die hierbei erstellte Struktur wird dabei zur Unterstützung der Kommunikation genutzt. Die Übersetzung von Kundenanforderungen in ein mechatronisches Produkt am Beispiel von Fertigungssystemen zeigt [MAUDERER 2011]. Weiterhin finden sich verschiedene Ansätze, die auf die Erstellung von domänenübergreifenden Simulationsmodellen ausgerichtet sind. So zeigt [LÜDECKE 2003] einen Ansatz zum simulationsgestützten Top-Down Entwurf heterogener Systeme, wobei der Entwurf und die Optimierung elektronischer Teilsysteme im Fokus stehen. Ebenso befasst sich [YEFIMENKO 2005] mit der Modellierung elektrischer Systeme sowie der Simulation von Elektronik und Hardware, wozu er Module mit definierten Schnittstellen zur Beschreibung elektronischer Bauteile verwendet. Eine sehr abstrakte Modellierung auf Basis mathematischer Modellen sowie deren Nutzung zur domänenübergreifenden Analyse und Optimierung zeigt [ENGE 2005]. Daneben finden sich Ansätze zur Automatisierung des Entwurfsprozesses. So zeigt [SELL 2007] den semi-automatisierten Konzeptentwurf auf Basis SySML, während [HELMS & SHEA 2012] objektorientierte Graph-Grammatiken zum automatisierten Entwurf von Produktarchitekturen verwenden.

---

<sup>43</sup> Function-Behaviour-Structure (FBS)

Der Einsatz von Virtual Reality (VR) zur Unterstützung der interdisziplinären Kommunikation auch in verteilten Teams findet sich bei [SHEN & GRAFE 2007], in dem jeweils disziplin- und anwenderspezifische Sichten und Partialmodelle auf das System zur Verfügung gestellt werden. Einen abstrakteren, auf MDM-basierenden Ansatz, zur Darstellung von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten zeigt [DIEHL 2009]. Er zeigt die dreidimensionale Visualisierung von Funktions- und Systemelementstrukturen sowie erste Ansätze zur Verknüpfung mit verantwortlichen Personen (Prozesssicht).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in dieser Gruppe von Ansätzen durch die Verwendung gemeinsamer Modelle die disziplinübergreifende Zusammenarbeit gefördert sowie disziplinübergreifende Abhängigkeiten beachtet werden. Es existieren in einigen Fällen auch Vorgehensmodelle zur Unterstützung der Modellerstellung, jedoch sind diese allgemein gehalten und nicht auf die Synchronisation ausgerichtet. Ebenso findet keine Betrachtung der Verknüpfung von Produkt- und Prozessstruktur statt.

Die **Unterstützung der mechatronischen Prozessgestaltung** wird abgesehen von allgemeinen Vorgehensmodellen (siehe Kap. 3.1.4) nicht sehr intensiv behandelt. Ein Ansatz zur Planung mechatronischer Entwicklungsprozesse sowie zur Speicherung und Wiederverwendung von Prozesswissen findet sich bei [REDENIUS 2006]. Die Planung des Prozesses basierend auf einer Klassifikation von Produkt und Problemstellung, die die Grundlage für Auswahl und Anpassung bereits erfolgreich durchgeführter Entwicklungsprozesse bildet. Im Forschungsverbund „FORFLOW“ wurde ein generisches Prozessmodell zur Entwicklung mechatronischer Produkte sowie ein zugehöriges Softwaretool erstellt [MEERKAMM et al. 2009]. Aus diesem Prozessmodell werden die durchzuführenden Entwicklungsschritte in Abhängigkeit der bestehenden Situation ausgewählt sowie im Verlauf der Entwicklung situationsabhängig angepasst [ROELOFSEN 2011].

Den Ansatz eines „General Framework“ für Prozesse [BROWNING et al. 2006] entwickelt [BROWNING 2009] weiter und schlägt ein „Process Architecture Framework“ vor, in dem sämtliche klassische Prozessinformationen (Input/Output etc.) sowie weitere Attribute der Prozessschritte (Werkzeuge, Organisationseinheiten) modelliert werden. Dieses Modell enthält sämtliche relevante Daten und kann zur Ausleitung von unterschiedlichen Sichten und Prozessmodellen genutzt werden. Somit kann es zur Synchronisation genutzt werden, da Änderungen in einem Modell direkt auf andere Modelle übertragen und sichtbar gemacht werden können. Weiterhin finden sich im Projektmanagement Ansätze zur Unterstützung der strukturellen Prozessplanung (z. B. Netzplantechnik) [BURGHARDT 2008, S.245FF]. Hierbei wird zwar die Abhängigkeit von Prozess- und Produktstruktur betont, jedoch findet keine inhaltliche Unterstützung der Planung statt und domänenübergreifende Änderungsabhängigkeiten werden nicht betrachtet.

Zusammenfassend bieten diese Ansätze eine Unterstützung der Planung des Vorgehens und der transdisziplinären Zusammenarbeit, jedoch werden produktseitige Änderungsabhängigkeiten sowie deren Auswirkungen auf den Prozess nicht genügend betrachtet. Eine Ausnahme bildet der Ansatz von [BROWNING 2009], der jedoch noch zu generisch beschrieben ist um eine konkrete Unterstützung darzustellen.

Die dritte Gruppe von Ansätzen befasst sich mit der **Gestaltung von PDM/PLM-Systemen** sowie dem Datenmanagement und der Werkzeugintegration. Einen Ansatz zur Handhabung

mechatronischer Produktdaten zeigt [DETMERING 2008], in dem verschiedene domänenspezifische PDM-Systeme über ein Backbone-PDM miteinander gekoppelt werden. Hierin können unterschiedliche Verknüpfungen zwischen den Systemelementen hinterlegt und bei der Entwicklung berücksichtigt werden. [KLEINER 2003] entwickelt in seinem Ansatz zur multidisziplinären Modellierung ein föderatives Produktdatenmodell, in dem mechanische und regelungstechnische Modelle zu einem übergreifenden Informationsmodell abstrahiert werden. Dieses dient als Basis der Verknüpfung unterschiedlicher CAX-Systeme in der Entwurfsphase. Das Management von Produktmodellen in einer gemeinsamen Plattform zur Kopplung unterschiedlicher IT-Systeme findet sich auch bei [EL-KHOURY 2006]. Die Produktdaten werden hierbei in einem domänenübergreifenden Informationsmodell integriert und zentral verwaltet. Das Konzept eines Meta-Datenmodell zur Integration von disziplinspezifischen Rechnersystemen über den gesamten Entwicklungsprozess findet sich auch bei [BELLALOUNA 2009]. Weiterhin werden auch die Ableitung von Workflows für unterschiedliche Anwendungsfälle und Prozessphasen betrachtet. Die Modellierung von Mechanik und Elektronik zur Unterstützung der Architekturentwicklung zeigen [CHEN et al. 2009]. Im Zentrum des Ansatzes steht die Modellierung von domänenübergreifenden Bedingungen (Constraints) zur Kopplung der Modelle. Weiterhin stellen sie umfangreiche Anforderungen an ein Tool aus Sicht der unterschiedlichen Domänen dar.

Zusammenfassend lässt sich für diese Gruppe festhalten, dass die disziplinübergreifende Zusammenarbeit sowie die Berücksichtigung von Änderungsabhängigkeiten gut unterstützt werden. Ebenso findet eine gemeinsame Betrachtung von Produkt und Prozess statt. Eine Unterstützung zur Planung und Anpassung des Vorgehens wird hingegen nicht adressiert.

Zum Abschluss werden **integrative Ansätze** behandelt, die eine gemeinsame Betrachtung von Produkt und Prozess vornehmen und in größeren Forschungsprojekten entstanden sind. Im Projekt „Fluidtronic“ [SCHUH et al. 2009] wurde ein Leitfaden zur Entwicklung fluidtechnischer-mechatronischer Produkte entwickelt. Dieser umfasst ein Referenzprozessmodell zur Ausleitung angepasster Entwicklungsprozesse sowie Methoden zur Unterstützung der Produkt- und Prozessgestaltung. Der Fokus des Leitfadens liegt neben der Prozessgestaltung vor allem auf der Simulation und Co-Simulation von Systemen mit fluidtechnischen Anteilen. Ferner existierte eine gemeinsame Datenbasis zum Management und Austausch von Produktmodellen in einem PDM/PLM-System. Es wird eine gemeinsame Betrachtung des Produktes zur Ableitung des Entwicklungsprozesses vorgenommen, jedoch werden Änderungsabhängigkeiten nur indirekt über die erstellten Simulationsmodelle bzw. Simulationsergebnisse betrachtet.

Mit dem Projektmanagement in der Entwicklung von Systemen mit hohem Softwareanteil befasst sich das Projekt „ProMIS“ [GEISBERGER & SCHMIDT 2005]. Der Fokus liegt auf der Unterstützung der frühen Phase und der interdisziplinären Produktbeschreibung. Hierzu wurden unterschiedliche Produktmodelle entwickelt. Daneben wurde ein Prozessmodell entwickelt, das aus 6 Phasen besteht und nach dem Quality-Gate Konzept aufgebaut ist. Die Gates am Ende jeder Phase dienen zur Synchronisation der domänenspezifischen Entwicklungen, der Feststellung des aktuellen Entwicklungsstandes (Reifegrad) sowie zur weiteren Vorgehensplanung auf Projektebene. Dazwischen werden kleinere Reviews (disziplinspezifisch und -übergreifend) durchgeführt, um innerhalb der Prozessphasen eine Synchronisation zu errei-

chen. Die Planung der zu erreichenden Ziele für das nächste Quality-Gate sowie die Reviews werden zu Beginn einer Phase geplant. Eine Betrachtung der Abhängigkeiten zwischen Produkt und Prozess wird dabei explizit nicht unterstützt, dies kann lediglich von den Bearbeitern bei der Planung des weiteren Vorgehens sowie der Ziele berücksichtigt werden.

Im Projekt „MIKADO“ [MIKADO 2009] wurde eine Kooperationsplattform zur Prüfung und Diagnose mechatronischer Produkte und Prozesse entwickelt. Diese stellt eine disziplinübergreifende Informationsbasis dar und ermöglicht durch die enthaltenen Kooperations-, Daten- und Workflowmanagementfunktionalitäten eine integrative und synchronisierte Entwicklung. Das übergreifende Informationsmodell umfasst vernetzte Teilmodelle aus den Disziplinen und ermöglicht die Übernahme von Änderungen in andere Modelle. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Simulation und Bewertung (Prozessreifegrade) von mechatronischen Entwicklungsprozessen. Diese werden aus vorhandenen Referenzbausteinen für sämtliche Prozessphasen erstellt und die Prozessschritte können über vorhandene Produktdaten (Dokumente) mit dem Produktmodell verknüpft werden. Hierbei ist die Verknüpfung jedoch lediglich zu Beginn der Prozessmodellierung vorgesehen, die Auswirkungen von Produktänderungen während der Prozessdurchführung werden nicht betrachtet.

Als ein Nachfolgeprojekt von MIKADO kann „ISYPROM“ [ISYPROM 2011] angesehen werden. Zielsetzung ist die Entwicklung systemorientierter, modellbasierter Methoden und Werkzeuge zur durchgehenden Unterstützung des Innovationsprozesses sowie deren PLM-Integration. Dies umfasst unter anderem eine Architektur zur Vernetzung von Modellen und Rechnerwerkzeugen, ein Werkzeug zur domänenübergreifenden Nachverfolgbarkeit von Produktänderungen [STARK et al. 2010] sowie Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessmodellierung sowie deren Bewertung. Die Entwicklungsprozesse werden auf Basis der Produktarchitektur aus dem integrierten Referenzprozessmodell instanziiert, so dass prozessrelevante Produkteigenschaften (Komplexität, Eigen-/Fremdfertigung, etc.) berücksichtigt werden können. Durch den Vergleich unterschiedlicher Architekturen können auch Auswirkungen von Änderungen im Produkt auf die Entwicklungsprozesse untersucht und bewertet werden. Die integrierte Produkt- und Prozessmodellierung und Analyse ist jedoch nur innerhalb der frühen Entwurfsphasen (Systementwurf) vorgesehen, eine explizite Unterstützung im Falle von Produktänderungen während der Prozessausführung findet nicht statt.

Eine Übersicht sowie ein Vergleich der untersuchten Ansätze hinsichtlich der identifizierten relevanten Unterstützungsaspekte in der mechatronischen Produktentwicklung (vgl. Kap. 2.3, Tabelle 2-2) ist in Tabelle 3-3 dargestellt.

			Unterstützte Phase im Prozess	Unterstützung der Vorgehensplanung	Unterstützung disziplinübergreifender Zusammenarbeit (Synchronisation)	Berücksichtigung disziplinübergreifender Änderungsabhängigkeiten	Integrative Betrachtung von Produkt und Prozess
Produktgestaltung	[Felgen 2007]	SE		(x)	x		
	Spezifikationstechnik	SE, (DE)	(x)	x	x		
	[Warkentin 2010]	SE, DE, SI		(x)	(x)		
	[Shen & Grafe]	SE, DE, SI		x	x		
	[Wu et al. 2009]	SE	(x)	x	x		
	[Diehl 2009]	DE, SI	(x)	x	x	(x)	
	[Bathelt 2006]	SE, DE	(x)	(x)	(x)		
	[Enge 2005]	SE		(x)	(x)		
	[Lüdecke 2003]	SE, DE, SI		(x)	(x)		
	[Yefimenko 2005]	DE, SI		(x)	(x)		
	[Sell 2007]	SE	(x)	(x)	x		
	[Helms & Shea 2012]	SE		(x)	x		
	[Dohmen 2002]	SE, DE, SI	(x)	x	x		
[Mauderer 2011]	SE, DE, SI	(x)	(x)	(x)	(x)		
Prozessgestaltung	[Redenius 2006]	SE, DE, SI	x	x		(x)	
	Forflow	SE, DE, SI	x	x		(x)	
	[Browning 2009]	SE, DE, SI		x	x	x	
	Projektmanagement	SE, DE, SI	x	(x)		(x)	
PDM/PLM Systeme	[El-Kouhry 2006]	SE, DE, SI		x	x	(x)	
	[Dettmering 2008]	SE, DE, SI		x	x		
	[Kleiner 2003]	SE		x	x		
	[Bellalouna 2009]	SE, DE, SI		x	x	(x)	
	[Chen et al. 2009]	SE		(x)	x	(x)	
Integrative Ansätze	MIKADO	SE, DE, SI	x	x	x	(x)	
	Promis	SE, DE, SI	x	x	(x)	(x)	
	Fluidtronic	SE, DE, SI	x	x	x	(x)	
	ISYPROM	SE, DE, SI	x	x	x	(x)	

SE: Systementwurf DE: Domänenspezifischer Entwurf SI: Systemintegration  
x: vorhanden (x): eingeschränkt vorhanden

Tabelle 3-3: Vergleich bestehender Ansätze zur disziplinübergreifenden Kollaboration in der Mechatronik

### 3.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus den durchgeführten Betrachtungen zum Stand der Technik sowie bestehender Ansätze können vorhandene Defizite identifiziert sowie der Handlungsbedarf in Bezug auf die in Kap. 2.3 dargestellten Zielsetzungen abgeleitet werden.

Die Grundlagen der **Entwicklung mechatronischer Systeme** zeigen, dass diese von hoher Komplexität sowie Heterogenität geprägt sind, die sich aus dem Zusammenwirken der Disziplinen, unterschiedlichen Sicht- und Vorgehensweisen sowie den vielfältigen domänenübergreifenden Abhängigkeiten herleiten. Dementsprechend wird der transdisziplinären Vernetzung und Synchronisation der Disziplinen in der Entwicklung ein hoher Stellenwert eingeräumt. Bestehende Ansätze konzentrieren sich jedoch zumeist auf die Unterstützung des disziplinübergreifenden Systementwurfs sowie auf die Systemintegration. Die Phase des domä-



nenspezifischen Entwurfs wird hingegen nicht ausreichend adressiert. Es wird stattdessen lediglich auf disziplinspezifischer Modelle, Methoden und Werkzeuge verwiesen. Gleichzeitig zeigt sich, dass ein einheitlicher Entwicklungsprozess keine sinnvolle Zielsetzung darstellt, sondern die disziplinspezifischen Prozesse effizient synchronisiert werden müssen. Hierfür wird in den bestehenden Ansätzen jedoch keine durchgängige methodische Unterstützung geboten. Es fehlen somit Methoden und Werkzeuge, die auch in den Phase des domänenspezifischen Entwurfs eine effektive Synchronisation der Disziplinen unter Berücksichtigung disziplinübergreifender Abhängigkeiten in Produkt und Prozess ermöglichen. Diese müssen in der Lage sein, bestehende disziplinspezifische Entwicklungsprozesse zu berücksichtigen und zu integrieren.

Das Verständnis des mechatronischen Produktes sowie seines Entwicklungsprozesses als vernetztes System wurde in den **Grundlagen des Systemdenkens und des Systems Engineering** dargelegt. Es wurde gezeigt, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturen und Relationsarten sowie deren Abhängigkeiten im System beachtet werden müssen. Eine sinnvolle Unterstützung muss daher eine systemtechnische Perspektive aufweisen und einen Umgang mit den vielfältigen Abhängigkeiten ermöglichen. Weiterhin wurde auf die Übertragbarkeit von Methoden und Werkzeugen des Systems Engineering auf die integrierte Produktentwicklung aufgrund der weitreichenden Überschneidung der beiden Ansätze eingegangen. Diese zeigt sich beispielsweise in den bestehenden Ansätzen zur modellgetriebenen Entwicklung mechatronischer Systeme, die jedoch hohe Anforderung an die verwendeten Produktmodelle sowie deren Integration stellen. Eine Übertragung von grundlegenden Gedanken, Methoden und Hilfsmitteln des Systems Engineering auf die disziplinübergreifende Zusammenarbeit und Synchronisation innerhalb einzelner Produkte bzw. Teilsysteme (z. B. Baugruppen) findet bisher nicht statt. Die bestehenden Ansätze fokussieren die Spezifikation und Integration von abgeschlossenen Teilsysteme und deren Schnittstellen. Eine methodische Unterstützung der technischen Entwicklung erfolgt im Systems Engineering bisher nicht. In der Praxis findet sich zudem häufig eine Trennung zwischen Mechanik- und Elektronik-/Softwareentwicklung. In Bezug auf die Entwicklung mechatronischer Produkte wird der Gedanke der Systemorientierung noch nicht konsequent angewendet. Eine durchgängige integrative Betrachtung von Produkt- und Prozesssystem zur Gestaltung und Steuerung des Entwicklungsprozesses erfolgt bisher nicht.

Zur Beherrschung der aus den vielschichtigen Abhängigkeiten herrührenden Komplexität, wurden die **Grundlagen des Komplexitätsmanagement** betrachtet. Hierbei bietet das strukturelle Komplexitätsmanagement auf Basis von Matrizen einen umfassenden Ansatz zur Modellierung, Analyse und Optimierung von Systemstrukturen mit unterschiedlichen Relationsarten auf einer abstrakten Ebene. Dies eröffnet die Möglichkeit zur domänenübergreifenden Systemmodellierung sowie zur Berücksichtigung und Visualisierung der Abhängigkeiten im Entwicklungsprozess. Es stellt die Grundlage zur Unterstützung der transdisziplinären Zusammenarbeit zur Verfügung, ohne eine Anpassung der disziplinspezifischen Prozesse und Modelle zu erfordern. Zudem existiert mit der Darstellung von Systemstrukturen als stärkebasierte Graphen eine Möglichkeit zur transparenten und disziplinübergreifend verständlichen Visualisierung von Abhängigkeiten. Es existieren jedoch bisher keine Ansätze, die eine Übertragung der vorhandenen Methoden und Werkzeuge zur die Modellierung, Planung und Analyse mechatronischer Produktentwicklungsprozesse darstellen. Hierzu sind die Entwicklung eines

geeigneten Systemmodells sowie Vorgaben für die Analyse und Interpretation von Strukturmerkmalen und -charakteristika im betrachteten Anwendungsfall vorzunehmen.

Die spezifischen Charakteristika von Entwicklungsprozessen sowie deren Modellierung wurden im **Prozess- und Projektmanagement** betrachtet. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Sichten auf Prozesse und entsprechende Zielsetzungen der Optimierung. Eine zentrale Herausforderung besteht dabei im Umgang mit der hohen Unsicherheit und den Iterationen in den Prozessen, die eine Begrenzung der Granularität sowie eine Anpassbarkeit während der Prozessdurchführung erfordern. Es wird somit ein Ansatz benötigt, der die Synchronisation der disziplinspezifischen Prozesse in einem Gesamtprozess unterstützt und gleichzeitig die spezifischen Vorgehensweisen und Randbedingungen (z.B. Iterationshäufigkeit und -dauer) der unterschiedlichen Teilprozesse integriert. Aus diesem Grund bietet sich eine Betrachtung auf Strukturebene an, wobei die notwendigen Strukturinformationen aus bestehenden Prozessmodellen abgeleitet werden können. Es fehlt somit auch hier ein Ansatz, der die disziplinübergreifende Modellierung und frühzeitige Planung des Prozesses auf Basis einer durchgängigen, integrativen Betrachtung der Strukturen von technischem Produkt und zugehörigem Entwicklungsprozess erlaubt. Zudem fehlen bisher geeignete Prozessmodelle zur transparenten Visualisierung der disziplinspezifischen Teilprozesse sowie ihrer direkten und indirekten Abhängigkeiten und Schnittstellen. Weitere zentrale Punkte sind die Planung sowie Steuerung und Kontrolle des Prozessfortschritts, wofür Ansätze aus dem Projektmanagement herangezogen werden können, die auf die Anforderungen der Mechatronik angepasst werden müssen. Es fehlen geeignete Reifegradindikatoren, die den hohen Vernetzungsgrad mechatronischer Produkte berücksichtigen und gleichzeitig verlässliche und transparente Aussagen über den Entwicklungsfortschritt zur Kontrolle und Steuerung des Prozess ermöglichen.

Aus der abschließenden Betrachtung **bestehender Ansätze** zur Unterstützung der Entwicklung mechatronischer Produkte lässt sich festhalten, dass die transdisziplinäre Planung und Synchronisation in der Mechatronik eine funktionsorientierte, integrierte Betrachtung der Abhängigkeiten von Produkt- und Prozessstruktur erfordert. Hierfür existieren bereits Ansätze, die jedoch auf die Phase des Systementwurfs sowie der präskriptiven Prozessplanung fokussiert sind. Eine methodische Unterstützung der Planung und Synchronisation in den Phasen des domänenspezifischen Entwurfs sowie der Systemintegration findet bisher nicht ausreichend statt. Die bestehenden Ansätze sind zudem komponentenorientiert oder modellgetrieben, wobei letzteres eine Anpassung der PDM/PLM-Infrastruktur erfordert. Eine konsequente Anwendung der Funktionsorientierung zur Gestaltung und Steuerung des Entwicklungsprozesses mit Hinblick auf die zu realisierenden Funktionen findet bisher nicht statt. Es fehlen somit Methoden und Hilfsmittel zur frühzeitigen Planung und entwicklungsbegleitenden Synchronisation des Entwicklungsprozesses auf Basis von Funktionsstrukturen sowie deren Abhängigkeiten. Weiterhin existiert keine methodische Unterstützung zur prozessbegleitenden, integrativen Modellierung, Analyse und Darstellung von domänenübergreifenden Wirk- und Änderungsabhängigkeiten zwischen technischem Produkt und Entwicklungsprozess. Die vorhandenen Ansätze beschränken sich auf Informationsflüsse zwischen den Entwicklungstätigkeiten bzw. das Vorliegen von Informationen und berücksichtigen keine die Abhängigkeiten in der Produktarchitektur.

## 4. Anforderungen an die transdisziplinäre Unterstützung mechatronischer Entwicklungsprozesse

*Nachdem in den beiden vorherigen Kapiteln die grundlegenden Herausforderungen der Entwicklung mechatronischer Systeme sowie der Stand der Forschung und Technik zur Unterstützung der transdisziplinären Produktentwicklung dargestellt wurden, werden aus den identifizierten Lücken und Optimierungspotenzialen sowie dem Erfahrungshintergrund Anforderungen für den zu entwickelten Ansatz abgeleitet.*

*Ausgehend von einer Zusammenfassung der identifizierten Zielsetzungen erfolgt die Darstellung von Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik. Es wird an dieser Stelle lediglich ein Überblick der erstellten Anforderungskategorien sowie darin enthaltener Anforderungen gegeben. Eine detaillierte Darstellung der Anforderungen sowie der Rahmenbedingungen befindet sich im Anhang 9.5 der Arbeit.*

*Weiterhin werden Anforderungen an die Modellierung von mechatronischen Produktreifegraden sowie an die Visualisierung des verwendeten Modells separat dargestellt. Diese beziehen sich auf spezifische Teilaspekte der Methodik und erfordern eine detailliertere Betrachtung.*

### 4.1 Anforderungen an die Methodik

Unter einer Methodik ist nach [PAHL et al. 2007] ein planmäßiges Vorgehen unter Einschluss von Methoden und Hilfsmitteln zu verstehen. Dementsprechend ist dieses Kapitel in grundlegende Anforderungen aus dem identifizierten Handlungsbedarf, inhaltliche Anforderungen an das Vorgehen zur Unterstützung der Planung und Synchronisation sowie Anforderungen an die Modellierung gegliedert.

Die grundlegende Zielsetzung des Ansatzes ist die Unterstützung einer transdisziplinären und **funktionsorientierten Entwicklung**, wobei der Fokus auf der **Synchronisation** der Disziplinen im mechatronischen Produktentwicklungsprozess liegt. Dazu soll eine Methodik zur Unterstützung der **Prozessplanung**, des entwicklungsbegleitenden Managements von **Änderungsabhängigkeiten** sowie der Ableitung von **Team- und Kommunikationsstrukturen** entwickelt werden. Hierdurch sollen zeitaufwändige **Iterationen vermindert** und die **Effizienz und Effektivität** des Entwicklungsprozesses erhöht werden. Eine weitere Zielsetzung ist die **Erhöhung der Transparenz** von Produkt und Prozess in Bezug auf disziplinübergreifende Abhängigkeiten, wodurch die **Komplexität vermindert** werden kann. Dafür ist eine einfache und disziplinübergreifend verständliche **Visualisierung** der Abhängigkeiten notwendig.

Aufgrund der Vielzahl von technischen und organisatorischen Abhängigkeiten ist hierzu eine **integrative Betrachtung von Produkt und Prozess** erforderlich. Die Betrachtungen sollen dabei **durchgängig über alle Prozessphasen** auf einer **strukturellen Ebene** durchgeführt werden, so dass eine hohe Akzeptanz und Verständlichkeit geschaffen und die Änderungsdynamik im Unternehmen nicht eingeschränkt wird. Zur Kontrolle und Steuerung des Prozesses

ist eine **Erfassung und Darstellung des Entwicklungsfortschrittes** (Produktreifegrad) erforderlich.

Im Folgenden werden die erstellten Anforderungskategorien der einzelnen Klassen dargestellt und kurz erläutert. Die zugehörigen Anforderungen wurden strukturiert in Anforderungslisten dokumentiert (siehe Tabelle 4-1), welche auch als Grundlage für eine abschließende Bewertung des entwickelten Ansatzes dienen (siehe Kap. 6.3). Die vollständigen Anforderungslisten befinden sich im Anhang 9.5 der Arbeit.

Tabelle 4-1: Ausschnitt der erstellten Anforderungsliste an die Methodik

	Anforderung	Bewertung
<b>Allgemeine Zielsetzungen</b>	Ermöglichung einer transdisziplinären und funktionsorientierten Entwicklung	x
	Unterstützung der transdisziplinären Prozessplanung	x
	Unterstützung der transdisziplinären Synchronisation	x
	Unterstützung bei der Erstellung von Team- und Kommunikationsstrukturen	x
	Unterstützung eines domänenübergreifenden Änderungsmanagements	x
	Integrative Betrachtung von technischem System und Entwicklungsprozess	x
	Berücksichtigung von Änderungsabhängigkeiten in Produkt und Prozess	x
	Verminderung von Iterationen im Entwicklungsprozess	(x)
	Steigerung von Effizienz und Effektivität	(x)
	Erhöhung der Transparenz in Produkt und Prozess	x
	Verminderung der Komplexität	x
	Strukturierung des Entwicklungsprozesses	x
	Durchgängigkeit der Methode über alle Prozessphasen	x
	Erfassung und Darstellung des Entwicklungsfortschrittes (Reifegrade)	(x)
	Hohe Akzeptanz bei Anwendern	(x)
	Einfache Anwendbarkeit der Methodik	(x)
	<b>Ausrichtung auf Mechatronik</b>	Strukturmanagement (keine weitere Belastung für Entwickler)
Keine Einschränkung der Änderungsdynamik im Unternehmen		x
Unterstützung der kontinuierlichen Verbesserung für Nachfolgeprozesse		x
Berücksichtigung der Transdisziplinärität und Heterogenität		x
Unterstützung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit		x
Berücksichtigung disziplinspezifischer Sichtweisen		x
Ermöglichung der Anpassbarkeit und des Wechsels der Sichtweisen		x
Integration disziplinspezifischer Vorgehensweisen		x
Berücksichtigung der Heterogenität der Entwicklungsprozesse (Änderungsdynamik, Iterationsanzahl und -dauer, Anzahl Prototypen, ...)		x
Transdisziplinärer Austausch von Informationen durch domänenübergreifende Beschreibung bzw. Darstellung		x
Schaffung von Akzeptanz durch Integration bewährter Vorgehen		x

### Grundlegende Anforderungen

- **Allgemeine Zielsetzungen:** Aus dem Handlungsbedarf abgeleitete Zielsetzungen
- **Ausrichtung auf Mechatronik:** Berücksichtigung spezifischer Aspekte wie Heterogenität in Sicht- und Vorgehensweisen sowie disziplinneutrale Beschreibung
- **Unternehmens- und Brancheneinflüsse:** Einsetzbarkeit der Methodik unabhängig von spezifischen Branchen oder Produkten
- **Phase im Prozess:** Durchgängige Anwendbarkeit über alle Prozessphasen mit Fokus auf domänenspezifische Entwicklung sowie Systemintegration
- **Integrierte Produkt- und Prozessbetrachtung:** Integrative Betrachtung von disziplinübergreifenden Wirk- und Änderungsabhängigkeiten, Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen technischem Produkt und Produktentwicklungsprozess.
- **Systemorientierung:** Unterstützung einer ganzheitlichen, domänenübergreifenden Sichtweise auf das betrachtete System aus Produkt und Entwicklungsprozess

- **Anpassbarkeit/Flexibilität:** Anpassbarkeit an geänderte Randbedingungen sowie Änderungen in der Prozessdurchführung
- **Anwender- und Zielgruppen:** Berücksichtigung unterschiedlicher Zielgruppen wie Entwickler, Prozessplaner und Verantwortliche (Entscheider, Projektleiter)
- **Softwaretechnische Unterstützung:** Unterstützbarkeit der Methode durch Rechnerwerkzeuge zur Minimierung des manuellen Aufwandes

#### **Inhaltliche Anforderungen an die Unterstützung der Planung und Synchronisation**

- **Vorgehensmodell:** Darstellung sämtlicher Vorgehensschritte in einer abstrahierten Darstellung und sinnvolle Verknüpfung der Einzelelemente, Führung und Unterstützung des Anwenders bei der Modellierung, Analyse und Interpretation von gesammelten Daten sowie Rückführung auf das betrachtete System durch geeignete Methoden und Hilfsmittel
- **Unterstützung der Planung:** Funktionsorientierte Planung eines abgestimmten, disziplinübergreifenden Sollprozesses zur Entwicklung eines funktionsfähigen und abgesicherten Gesamtsystems auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen als Grundlage der Prozesskontrolle und -steuerung
- **Unterstützung der Synchronisation:** Ermöglichung eines verbesserten Zusammenwirkens der Disziplinen durch Berücksichtigung von disziplinübergreifenden Wirk- und Änderungsabhängigkeiten aus unterschiedlichen Perspektiven, Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen sowie domänenübergreifende Erfassung des Entwicklungsfortschritts

#### **Anforderungen an die Modellierung**

- **Allgemeine Anforderungen:** Bereitstellung eines domänenübergreifenden, durchgängigen Informationsmodells zur redundanzfreien Abbildung der relevanten Informationen
- **Grundlage der Prozessunterstützung:** Bereitstellung einer Basis zur Prozessplanung sowie zur Synchronisation der Disziplinen während der Prozessdurchführung
- **Domänenübergreifende Verständlichkeit:** Verwendung einer einheitlichen, domänenübergreifenden Modellierungssprache für Produkt und Entwicklungsprozess
- **Abbildung struktureller Aspekte:** Abbildbarkeit unterschiedlicher Aspekte und Sichten auf die Systemstruktur sowie deren Vernetzung
- **Elemente und Relationen:** Unterstützung unterschiedlicher Element- und Relationsarten in einem Modell sowie deren flexible Manipulation
- **Flexibilität und Erweiterbarkeit:** Anpassbarkeit auf unternehmensspezifische Randbedingungen sowie Erweiterbarkeit in Bezug auf verwendete Elemente und Relationen
- **Detaillierungsgrad:** Unterstützung unterschiedlicher Detaillierungsgrade und Abstraktionsebenen in den verschiedenen Systemstrukturen

- **Prozesscontrolling:** Abbildbarkeit des aktuellen Entwicklungsstandes in Bezug auf Funktionen und Komponenten
- **Visualisierung:** Transparente und domänenübergreifende Verständlichkeit des verwendeten Systemmodells

## 4.2 Anforderungen an die Modellierung mechatronischer Produktreifegrade

Ein weiterer Aspekt umfasst die Steuerung und Kontrolle des Entwicklungsprozesses. Dazu wird ein geeignetes Reifegradsystem zur Modellierung des Entwicklungsfortschrittes benötigt. Es wurden daher Anforderungen und Zielsetzungen für ein Produktreifegradsystem in der Mechatronikentwicklung abgeleitet [PRODUKTENTWICKLUNG 2011e, S.57ff]. Diese wurden in die Bereiche allgemeine Ziele und grundlegende Eigenschaften, Anforderungen an die Modellierung sowie Anforderungen an die Reifegradindikatoren untergliedert.

Unter **allgemeine Ziele und grundlegende Eigenschaften** des Reifegradsystems wurden folgenden Anforderungen aufgestellt:

- Produktreifegradsystem als Mittel zur Steuerung und Kontrolle des Prozesses
- Förderung der Erzeugung und Verfolgung konkreter Zielvorstellungen und Zielsetzungen
- Identifikation von Problem- und Optimierungsstellen
- Unterstützung der Entscheidungsfindung
- Unterstützung der transdisziplinären Zusammenarbeit

Der zweite Bereich betrifft **Anforderungen an die Modellierung**. Diese beziehen sich sowohl auf die Erstellung sowie auf die Darstellung des Modells. Es wurden folgend Anforderungen abgeleitet:

- Lösungsneutralität (domänenunabhängige Modellierung und Darstellung)
- Produkt- und Branchenunabhängigkeit
- Berücksichtigung unterschiedlicher Perspektiven (Funktionen bzw. Komponenten)
- Anpassbare Granularität und Aggregation
- Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Kennzahlen
- Hohe Aktualität und einfache Aktualisierbarkeit
- Ganzheitliche Betrachtung und Durchgängigkeit
- Umsetzbarkeit in Rechnerwerkzeug

Der letzte Bereich bezieht sich auf die verwendeten **Reifegradindikatoren**, welche als Basis für die Erfassung und Berechnung des Reifegrades dienen:

- Objektivität
- Auswertbarkeit
- Überprüfbarkeit
- Klarheit, Einfachheit

### 4.3 Anforderungen an die Visualisierung des Modells

Ein weiterer Punkt ist die transparente und disziplinübergreifende Visualisierung des zur Planung und Synchronisation verwendeten integrierten Produkt- und Prozessmodells, welches auf einer Multiple-Domain Matrix basiert. Im Rahmen der Entwicklung der Methodik wurde daher auch eine Zielsetzung für eine Visualisierung dieses Systemmodells aufgestellt [DIEHL et al. 2008; DIEHL 2009]:

- Transparente Visualisierung des Systemmodells
- Erstellung und Manipulation des integrierten Produkt- und Prozessmodells
- Darstellung der aller enthaltenden Domänen und deren Abhängigkeiten
- Unterstützung bei der Ableitung des Prozessmodells aus dem Produktmodell sowie der Prozessanalyse
- Unterstützung einer funktions- und bauteilorientierten Perspektive
- Darstellung von Vernetzungen innerhalb sowie zwischen den enthaltenen Domänen
- Möglichkeit zur Visualisierung von Eigenschaften der Elemente (z. B. Entwicklungsstand, Kosten, etc.)





## 5. Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse

*Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel dargestellten Anforderungen an eine transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine entsprechende Methodik entwickelt. Die Methodik umfasst ein grundlegendes Vorgehensmodell bestehend aus unterschiedlichen Modulen zur Modellierung, Planung, Analyse und Steuerung des Entwicklungsprozesses sowie geeigneten Methoden und Hilfsmitteln zur Unterstützung der einzelnen Schritte. Die entwickelte Methodik wird im Folgenden anhand des aus der Einleitung bekannten Beispiels der Entwicklung eines mechatronischen Bremssystems für ein elektrisch angetriebenes Go-Kart dargestellt um die einzelnen Schritte sowie deren Ergebnisse zu verdeutlichen.*

*Zu Beginn des Kapitels erfolgt nach der Darlegung der Grundlagen und Anwendungsgebiete des Ansatzes sowie der Einführung des erläuternden Entwicklungsbeispiels zunächst eine Vorstellung des Rahmenwerks sowie des zugrunde gelegten Systemverständnisses der mechatronischen Produktentwicklung. Im Anschluss wird das Verständnis eines funktionsorientierten Entwicklungsprozesses dargestellt, das die Grundlage für die Planung und Synchronisation bildet. Im Anschluss erfolgt die Darstellung des Vorgehensmodells mit den Modulen für die Systemmodellierung, die präskriptive Prozessplanung, die deskriptive Synchronisation sowie die Kontrolle und Steuerung des Prozesses. Zum Abschluss erfolgt eine Betrachtung zur Rechnerunterstützung und Visualisierung des entwickelten Ansatzes.*

### 5.1 Grundlagen und Anwendungsgebiete

Die wesentlichen Herausforderungen liegen in der Synchronisation der unterschiedlichen Disziplinen im Entwicklungsprozess. Diese treten vor allem während der Phase des domänenspezifischen Entwurfs auf, da hier die eigentliche Konkretisierung und Ausgestaltung des disziplinübergreifenden Systemkonzeptes in den einzelnen Disziplinen stattfindet. Die Herausforderung besteht darin, diese Phase methodisch so zu unterstützen, dass die grundlegenden disziplinspezifischen Vorgehensweisen weitgehend erhalten bleiben, jedoch besser aufeinander abgestimmt (synchronisiert) werden. Dazu sind ein erhöhtes Systemverständnis sowie die Kenntnis disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten auf Produkt- und Prozessebene erforderlich.

Der **domänenspezifische Entwurf bzw. die Konkretisierung** eines bewerteten und ausgewählten Konzeptes erfordert nach STEFFEN einen definierten Entwicklungsprozess. In diesem werden auf Basis der Partitionierung der Systemelemente die einzelnen Entwicklungsschritte geplant, die ebenfalls die Definition von Meilensteinen, zu erreichenden Reifegraden sowie durchzuführenden Test- und Abstimmungsschritten umfassen [STEFFEN 2006, S.125]. Diese Randbedingungen finden sich vor allem in **Serienentwicklungsprozessen**, in denen das Lösungskonzept grundsätzlich zu Beginn der Konkretisierung festgelegt werden kann. Für Entwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten bzw. beim Einsatz neuartiger Technologien ist diese Rahmenbedingung nur begrenzt vorhanden. Während in Serienentwicklungen die

ausgewählte Architektur nur minimal geändert bzw. angepasst werden muss, kann im Rahmen von Forschungsprojekten eine vollständige Änderung bzw. Anpassung erforderlich sein.

In Kap. 2.2 sowie Kap. 3.1 wurde gezeigt, dass eine Erstellung eines einheitlichen „mechatronischen Entwicklungsprozesses“ über alle Disziplinen und Prozessphasen hinweg keine sinnvolle Maßnahme darstellt. In den unterschiedlichen Disziplinen haben sich spezifische Vorgehensmodelle und Werkzeuge etabliert, die zur Bearbeitung der jeweiligen Domäne geeignet sind. Statt einer Vereinheitlichung der Entwicklungsprozesse ist daher eine transdisziplinäre Vernetzung und Synchronisation der domänenspezifischen Entwicklungsprozesse erforderlich. Diese Synchronisation muss dementsprechend so gestaltet sein, dass die einzelnen Domänen sowohl unabhängig voneinander ihre spezifischen Aufgabenstellungen und Teilsysteme bearbeiten können, gleichzeitig jedoch sichergestellt wird, dass sie sich zu geeigneten Zeitpunkten über die richtigen Themen austauschen. Wie gezeigt werden kann, bewährt sich dies bereits in der industriellen Praxis, da nach einer Studie der Aberdeen Group [BOUCHER & HOULIHAN 2008, S.14] die erfolgreichsten der betrachteten Unternehmen in transdisziplinären Entwicklungsprozesse folgenden Maßnahmen durch- bzw. einführen:

- Etablierung eines formalisierten Reviewprozesses mit allen am Prozess beteiligten Disziplinen über den gesamten Lebenszyklus hinweg
- Durchführung eines formalisierten Reviewprozesses nach der Integration von Komponenten aus verschiedenen Disziplinen mit den Beteiligten
- Formale Dokumentation von disziplinübergreifenden Integrationsaspekten
- Entwickler werden bei Änderungen an Teilsystemen in anderen Disziplinen informiert, sofern diese Auswirkungen auf ihre eigenen Entwicklungen nach sich ziehen

Aus dieser Vorstellung ergibt sich die **prinzipielle Vorstellung zur Synchronisation** mechatronischer Entwicklungsprozesse, die sich an bestehenden Modellen [GEISBERGER & SCHMIDT 2005] zum Projektmanagement transdisziplinärer Entwicklungsprozesse orientiert (siehe Bild 5-1). Der zugrundeliegende Lösungsansatz basiert auf einem in Phasen untergliederten Entwicklungsprozess, wobei zu Beginn und Ende einer Phase disziplinübergreifende Meilensteine zu erreichen sind, durch die eine regelmäßige Synchronisation der Disziplinen erreicht wird. Diese Meilensteine werden verwendet, um einen Austausch über den Entwicklungsfortschritt oder die Integration von Entwicklungsartefakten durchzuführen. Die konkrete Ausgestaltung kann dabei als Review, Quality- oder Decision-Gates erfolgen. Dieses Modellverständnis passt auch zu den im Systems Engineering angewandten Methoden zur Prozessgestaltung in interdisziplinären Entwicklungsprojekten (vgl. Kap. 3.2). Zusätzlich zur Synchronisation über die Meilensteine können auch während der einzelnen Phasen kleinere Synchronisationsschleifen zwischen zwei oder mehreren Disziplinen durchgeführt werden. Diese werden in der Regel nicht vollständig detailliert vorausgeplant, sondern in Abhängigkeit des Projektverlaufs durchgeführt. Das hier dargestellte Phasenmodell des Entwicklungsprozesses orientiert sich an der VDI-Richtlinie 2206 [VDI 2004] zur Einteilung der grundlegenden Phasen im Entwicklungsprozess. Grundsätzlich können auch andere Prozessmodelle bzw. Phasenbezeichnungen verwendet werden.

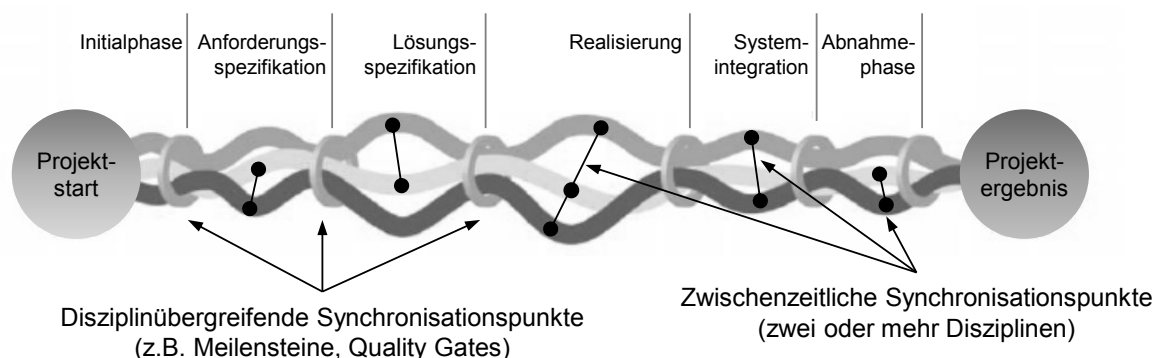


Bild 5-1: Prinzipielle Darstellung der Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse  
 [in Anlehnung an GEISBERGER & SCHMIDT 2005]

Zu Beginn finden in einem Projekt eine Initialphase sowie die Anforderungsspezifikation statt. Im Anschluss findet die disziplinübergreifende Spezifikation statt, an deren Ende das disziplinübergreifende Systemkonzept steht. In diesen Phasen ist die disziplinübergreifende Zusammenarbeit zumeist gut etabliert und es existiert eine Vielzahl von Methoden zu ihrer Unterstützung (siehe Kap 3.1). Aus diesem Grund fokussiert der entwickelte Ansatz die nachfolgenden Phasen des domänenspezifischen Entwurfs sowie der Systemintegration, die bisher nicht ausreichend methodisch unterstützt werden.

Das **generelle Vorgehen** in der entwickelten Methodik umfasst drei übergeordnete Phasen und ist an das Vorgehen im strukturellen Komplexitätsmanagement [LINDEMANN et al. 2008, S.64] angelehnt (siehe Bild 5-2). Im ersten Schritt findet eine zur Zielerreichung geeignete *Modellbildung* statt. In dieser wird ein abstraktes Strukturmodell des mechatronischen Systems sowie des Entwicklungsprozesses erstellt. Die Definition des Systems sowie der notwendigen Domänen basiert dabei auf dem identifizierten Handlungsbedarf sowie den daraus abgeleiteten Anforderungen (siehe Kap. 5.2). Der zweite Schritt ist die *Ableitung eines Prozessplans* aus dem Produktkonzept. Dieser umfasst die Definition von Meilensteinen sowie die zu ihrer Erreichung notwendigen Prozessschritte. Schwerpunkt und Ergebnis ist die Erstellung eines Soll-Prozesses für die mechatronische Entwicklung, der interdisziplinäre Abhängigkeiten berücksichtigt und der eine optimale Synchronisation der Disziplinen erlaubt. Dieser Prozessplan bildet die Vorgabe (Soll-Prozess) für die nachfolgende Prozessdurchführung und gleichzeitig die Grundlage für die Prozesssteuerung und -kontrolle. Im *Verlauf der Prozessdurchführung* werden zwei unterschiedliche Aspekte adressiert. Zum einen die begleitende Analyse von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten und die Ableitung von Kommunikations- und Teamstrukturen. Diese sind vor allem im Fall von Änderungen entscheidend. Der zweite ist die prozessbegleitende Prozesssteuerung, in der der Fortschritt der Entwicklung überwacht und visualisiert wird (Reifegradbetrachtungen) und ggf. korrigierende Maßnahmen abgeleitet werden.

Zur Unterstützung dieser übergeordneten Schritte mit ihren spezifischen Schwerpunkten und Zielsetzungen wird ein geeignetes **Vorgehensmodell** benötigt, dessen einzelne Schritte mit spezifischen Methoden und Hilfsmitteln unterstützt werden müssen. Hierzu ist zunächst eine

geeignete **Modellbildung** des sozio-technischen Systems der mechatronischen Produktentwicklung erforderlich, die als Basis für die weiteren Schritte dient. Zur Unterstützung der einzelnen Phasen bzw. Aufgabenstellungen werden verschiedene **Module** bereitgestellt, die die jeweils notwendigen Schritte und Hilfsmittel bereitstellen. Die einzelnen Module sind jedoch auch unabhängig voneinander bzw. iterativ auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden verwendbar. Durch dieses Modulkonzept ist die Methodik leicht an die bestehende Situation im Unternehmen, die zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie die betrachtete Fragestellung anpassbar. Eine Sonderstellung nimmt die Modellierung ein, die die Basis für die übrigen Schritte darstellt und somit immer erforderlich ist. Eine Übersicht des Vorgehens mit den Beschreibungen der einzelnen Module ist in Bild 5-2 dargestellt. Dieses Vorgehen bildet gleichzeitig das Standardvorgehen.

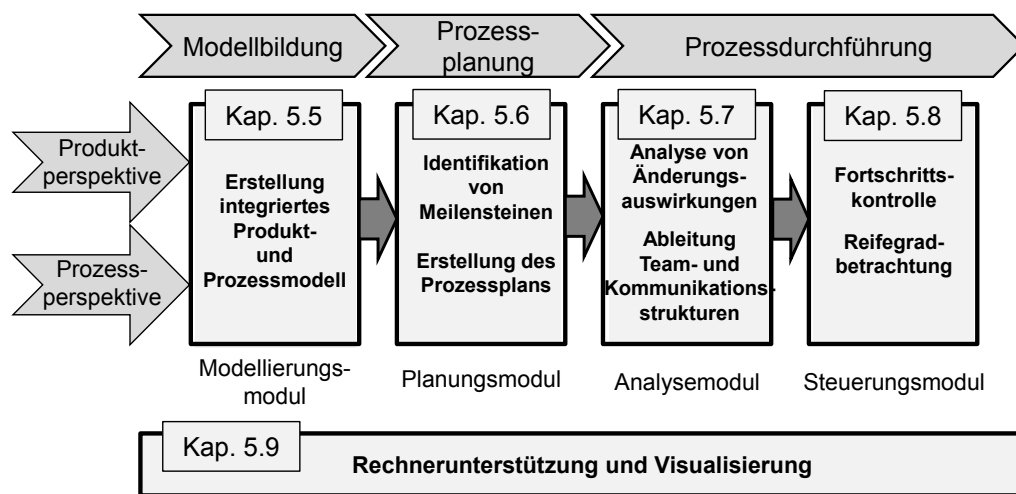


Bild 5-2: Überblick des entwickelten Ansatzes zur Unterstützung mechatronischer Entwicklungsprozesse

Zunächst findet die **Modellbildung** des betrachteten Systems unter Verwendung eines geeigneten Metamodells sowie die Akquise der notwendigen Daten statt (siehe Kap. 5.4). Wie bereits in den Grundlagen dargestellt (vgl. Kap. 3.3.2), eignet sich für den hier betrachteten Anwendungsfall ein auf einer Multiple-Domain Matrix (MDM) basierendes Modell zur Informationshandhabung. Die Erfassung von Systemen in Form von Matrizen und die Darstellung mittels Graphen erlauben eine transparente Visualisierung und eine umfangreiche Analyse der Elemente und deren Relationen. Die Identifikation und Interpretation von Teilstrukturen sowie Strukturelementen ermöglicht die Ableitung konkreter Handlungsoptionen für die strukturelle Optimierung komplexer Systeme (siehe Kap. 3.3.3). Dieses Modell bildet die Basis für alle übrigen Schritte und ist daher für sämtliche Analysen und Optimierungen erforderlich. Abhängig von der betrachteten Fragestellung sowie dem geforderten Detaillierungsgrad kann der Umfang des Modells variieren. Die Definition des Systems mit den zu betrachteten Elementen sowie die zu ermittelnden Inputdaten sind in diesem Fall durch das entwickelte Rahmenwerk sowie das Systemmodell der mechatronischen Produktentwicklung (siehe Kap. 5.2) bereits vorgegeben. Die Schwerpunkte in dieser Phase liegen somit in der Akquise und Aufbereitung der Inputdaten sowie der Erstellung des Modells. Die zur Erstellung des System-

modells notwendigen Schritte und Hilfsmittel sind im **Modellierungsmodul** zusammengefasst.

Die verknüpfte Betrachtung von **Produkt- und Prozessperspektive** in Form von Produktstruktur, Entwicklungsprozess und Aufbauorganisation wird von unterschiedlichen Autoren als notwendig angesehen (vgl. Kap. 2.2 ). So wird davon ausgegangen, dass sich diese gegenseitig beeinflussen bzw. ineinander widerspiegeln, wobei eine perfekte Übereinstimmung dabei jedoch nicht gewollt oder sogar unvorteilhaft ist. Bei einer unzureichend integrierten Betrachtung sind jedoch häufig Qualitätsmängel in den Produkten festzustellen.

Vor der Durchführung des Entwicklungsprozesses findet im Anschluss an die Modellbildung die **präskriptive Planung** des Entwicklungsprozesses statt. Die Grundlage hierzu bildet das matrixbasierte Strukturmodell der Produktarchitektur sowie der Elemente des Entwicklungsprozesses. Für die Anwendung des strukturellen Komplexitätsmanagements zur Ableitung, Festlegung oder Optimierung der Reihenfolge der Prozessschritte der Prozessstruktur finden sich bereits in der Literatur zahlreiche Beispiele (siehe Kap. 3.4.1 und 3.4.3). Die zur Prozessplanung durchgeführten Schritte und Methoden werden im **Planungsmodul** dargestellt.

In der Phase der Prozessdurchführung werden zwei Schwerpunkte unterstützt. Zum einen die **entwicklungsbegleitende Analyse** des Prozesses, in der Auswirkungen von technischen Änderungen (Engineering Change) sowie Änderungen in der Organisation (Organizational Change, siehe Kap. 3.4.3) untersucht und visualisiert werden. Technische Änderungen umfassen Änderungen an einzelnen oder mehreren Komponenten, die sich aufgrund externer Einflüsse (Anforderungen, Kundenwünsche) oder aufgrund der Produktkonkretisierung ergeben. Sie können sich sowohl auf die Komponenten, als auch auf die Funktionsstruktur beziehen. Dabei sind vor allem die Auswirkungen auf benachbarte Disziplinen von Interesse, die aktuell häufig unbekannt sind. Anwendungsfälle aus dem Bereich der organisatorischen Änderungen betreffen die Restrukturierung von Abteilungen und Aufgabengebieten oder das Hinzukommen bzw. der Wegfall von Mitgliedern im Entwicklungsprozess. Diesen kann so ein einfacher Überblick über die Abhängigkeiten im System (Schnittstellen zu anderen Personen) sowie ihre Rolle gegeben werden. Weiterhin kann analysiert werden, in welchen Phasen welche Personen von Meilensteinen betroffen sind und so eine optimale Zusammensetzung von Besprechungen gefunden werden. Die prinzipiellen Anwendungsmöglichkeiten sowie die Eignung von Strukturmodellen zur Analyse von Änderungen werden beispielsweise bereits bei [LINDEMANN et al. 2008, S.13FF] dargestellt, jedoch nicht in den Kontext der mechatronischen Produktentwicklung gebracht (besondere Bedeutung der Domänengrenzen).

Eine weitere Zielsetzung in der Betrachtung von Änderungen besteht in der Unterstützung von **Entscheidungen** im Entwicklungsprozess (siehe z. B. [KRISHNAN & ULRICH 2001; WYNN 2007; CHALUPNIK et al. 2009]). Dies geschieht im vorliegenden Anwendungsfall mit zwei Zielrichtungen: Zum einen kann durch die Analyse und Visualisierung von Änderungen ein Erkenntnis bzw. Abschätzung über den Aufwand getroffen werden. Bei nicht-zwingend notwendigen Änderungen kann somit eine Entscheidung unterstützt werden, ob diese Änderungen durchgeführt werden oder ob sie in eine Neuentwicklung verlegt werden. Der zweite Punkt betrifft wiederum die Zusammensetzung von Team- und Kommunikationsstrukturen, die zur Abstimmung der Entscheidung notwendig sind.

Der zweite Unterstützungsschwerpunkt der Prozessdurchführung liegt in der **Steuerung und Kontrolle** des Entwicklungsprozesses. Dies beinhaltet die Erfassung des aktuellen Prozessfortschrittes sowie den Vergleich mit dem angestrebten Stand. Weiterhin muss der aktuelle Entwicklungsstand, beispielsweise in Form von Reifegraden, transparent erfasst und dargestellt werden, um Prognosen und Handlungsalternativen ableiten zu können. Dies stellt somit eine Ergänzung zur Prozessplanung sowie zur -analyse dar.

Einen wesentlichen Punkt bei der Entwicklung mechatronischer Produkte sowie im gewählten Ansatz stellt eine konsequente **Funktionsorientierung**<sup>44</sup> im gesamten Produktentwicklungsprozess dar (siehe Kap. 2.3). Für die Beschreibung des mechatronischen Systems und des zugehörigen Entwicklungsprozesses wurde eine funktionale Sichtweise als geeignete Beschreibungsform identifiziert. Der Ansatz stellt in Konsequenz die Realisierung von vernetzten und interagierenden Funktionen des mechatronischen Produktes in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Die Komponenten und deren Struktur dienen der Realisierung bestimmter Aspekte der darzustellenden Funktionen. Dieses Verständnis findet sich somit auch in der Gestaltung des Entwicklungsprozesses und speziell in Bezug auf Integrationsaspekte wieder. Der mechatronische Produktentwicklungsprozess ist somit primär auf die Realisierung und Überprüfung von Funktionen des Produktes ausgerichtet<sup>45</sup>. Dabei ist zu beachten, dass die Denkweise der Bereiche Software und Elektrik/Elektronik funktionsgetrieben, und die der klassischen mechanischen Konstruktion bauteilgetrieben ist. Die Modellierung muss daher in der Lage sein beide Sichtweisen zu integrieren. Auf das entsprechende System- und Prozessverständnis sowie eine funktionsorientierte Prozessgestaltung wird in Kap. 5.3 eingegangen.

Die **Beschreibung der entwickelten Methodik** zur Prozessplanung und -synchronisation sowie die Erläuterung der einzelnen Schritte und Hilfsmittel erfolgt am Beispiel der Entwicklung eines mechatronischen Bremssystems für ein elektrisch angetriebenes Go-Kart. Dieses Beispiel wurde bereits in der Einleitung zur Motivation und Verdeutlichung der Probleme in mechatronischen Entwicklungsprozessen verwendet (siehe Kap. 1.1). Das Bremssystem wurde im Rahmen von mehreren durch den Autor der Arbeit betreuten Studienarbeiten entwickelt und realisiert [PRODUKTENTWICKLUNG 2011c; PRODUKTENTWICKLUNG 2011b; PRODUKTENTWICKLUNG 2011a]. Jeder der Beteiligten war für die Entwicklung eines bestimmten Teilsystems verantwortlich, so dass sowohl eine geeignete mechatronische Aufgabenstellung vorlag sowie eine Entwicklung mit mehreren Entwicklern bzw. Entwicklerteams nachgebildet werden konnte.

Die Aufgabenstellung bestand in der Weiterentwicklung des hydraulischen Bremssystems eines elektrisch angetriebenen Go-Karts. Dieses Go-Kart wurde am Lehrstuhl für Produktentwicklung gezielt zur Beobachtung von Entwicklungsprozessen und zur Evaluation von Prozessunterstützungsansätzen entwickelt [vgl. LAUER 2010, S.136ff]. Die Entwicklung war in zwei Phasen unterteilt: Zunächst die Entwicklung eines funktionsfähigen Fahrzeugs in der

---

<sup>44</sup> Die Funktionsorientierung bezieht sich wie in Kap. 2 dargelegt auf die Funktionen des technischen Systems und nicht auf die Gestaltung der Organisation. Eine Definition und detaillierte Betrachtung des Funktionsbegriffs wird in Kap. 5.2 sowie Kap. 5.5.2 vorgenommen.

<sup>45</sup> Neben Funktionen müssen auch Eigenschaften des Produktes (wie Gewicht) realisiert werden. Die Festlegung dieser Eigenschaften findet in den disziplinspezifischen Entwicklungen statt und die Überprüfung der Zielerreichung muss parallel zu den Funktionen erfolgen. Die Struktur des transdisziplinären Gesamtprozesses wird nach dem hier verwendeten Verständnis von den Funktionen bestimmt.

ersten Phase, im Anschluss die Weiterentwicklung bzw. Optimierung einzelner Teilsysteme. Der betrachtete Entwicklungsprozess gehörte zur zweiten Phase. Der Ausgangszustand zu Beginn der Entwicklung bestand aus einem funktionsfähigen Go-Kart mit einem konventionellen hydraulischen Bremssystem. Im Zuge der Weiterentwicklung verschiedenerer Subsysteme sollte eine mechatronische Bremse realisiert werden. Mit dieser soll das Bremsmoment an jedem Rad unabhängig von der Bremskraft des Fahrers bzw. der Bremspedalstellung sowie von den anderen Rädern eingestellt werden können. Dadurch können im Vergleich zur rein hydraulischen Lösung zusätzliche Funktionen wie ABS oder ESP realisiert werden. Daneben sollte auch die Ergonomie der Pedalbedienung verbessert werden, woraus sich Änderungen an der Pedalerie des Fahrzeugs ergaben.

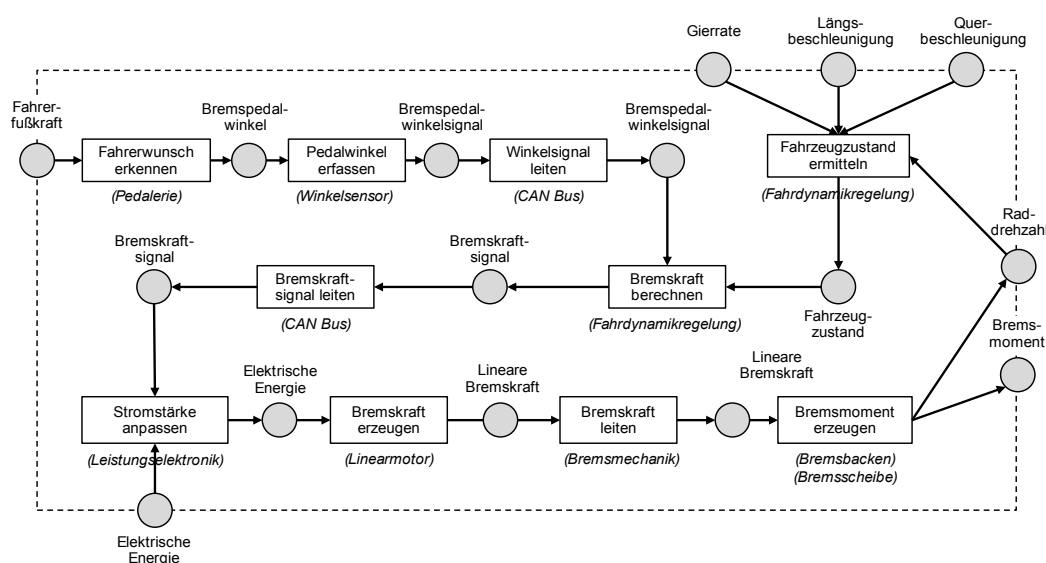


Bild 5-3: Umsatzorientiertes Funktionsmodell des mechatronischen Bremssystems

Im Anschluss an die Anforderungsklä rung und den disziplinübergreifenden Systementwurf wurden ein interdisziplinäres Lösungskonzept sowie die Partitionierung des Bremssystems festgelegt. Das Lösungskonzept besteht im Kern aus einer elektromechanischen Bremse, in der die erforderliche Bremskraft über einen Linearstellzylinder erzeugt wird [BREUER & BILL 2006, S.299FF]. Dieser besteht aus einem Elektromotor mit einer Spindel zur Erzeugung hoher axialer Kräfte. Die erzeugte Kraft wird über eine Bremsmechanik auf die beiden Reibbeläge übertragen, die auf eine Bremscheibe wirken und so das Bremsmoment am entsprechenden Rad erzeugen. Für jedes Rad ist ein separater Stellzylinder vorgesehen, der unabhängig von den übrigen Rädern angesteuert wird und somit das Bremsmoment und die Raddrehzahl eingestellt werden können. Die Ansteuerung der Linearstellzylinder erfolgt über das zentrale Steuergerät des Fahrzeuges, welches über CAN-Bus mit der Leistungselektronik der Aktoren verbunden ist. Die Energieversorgung der Bremsseinheiten ist über die Fahrzeugbatterien realisiert, aus denen auch die Antriebsenergie entnommen wird. Zur Bestimmung der erforderlichen Drehzahlen bzw. Bremsmomente an jedem Rad, ist im zentralen Steuergerät ein Fahrzeugmodell hinterlegt. Abhängig von der Vorgabe des Fahrers (Bremswunsch) sowie dem aktuellen Zustand des Fahrzeuges werden Soll-drehzahlen für die einzelnen Räder berech-

net. Der Zustand des Fahrzeuges wird mit Hilfe eines integrierten 3-Achsen-Beschleunigungssensors (Längs-, Querbearbeitung, Gierrate) sowie mit Raddrehzahlsensoren an den Rädern bestimmt. Die Vorgabe des Fahrers wird über einen an der Welle des Bremspedals angebrachten Winkelsensor erfasst. Das erzeugte Bremssignal wird ebenfalls über den CAN-Bus an das zentrale Steuergerät übermittelt. Das gewählte Lösungskonzept ist in Bild 5-3 als umsatzorientiertes Funktionsmodell (vgl. [PONN & LINDEMANN 2011, S.71FF]) dargestellt.

Im Rahmen des interdisziplinären Systementwurfs wurden neben den erforderlichen Funktionen auch die zu ihrer Realisierung erforderlichen Komponenten festgelegt. Diese sind analog zu Funktionen miteinander vernetzt (vgl. Kap. 3.2.2). An dieser Stelle wird lediglich die physikalische Komponentenstruktur gezeigt, in denen die Elemente aufgrund gemeinsamer physikalischer Schnittstellen miteinander verbunden sind (siehe Bild 5-4). Der entsprechende Graph ist ungerichtet, während das in Bild 5-3 dargestellte umsatzorientierte Funktionsmodell die Informations- und Energieflüsse wiedergibt und somit einen gerichteten Graphen darstellt. Aus der groben Betrachtung der Komponentenstruktur wird bereits deutlich, ohne den weiteren Ergebnissen der Arbeit vorwegzugreifen, dass es sich um eine Busarchitektur handelt (vgl. [ULRICH 1995]), in der der Rahmen sowie der CAN-Bus zentrale Elemente darstellen.

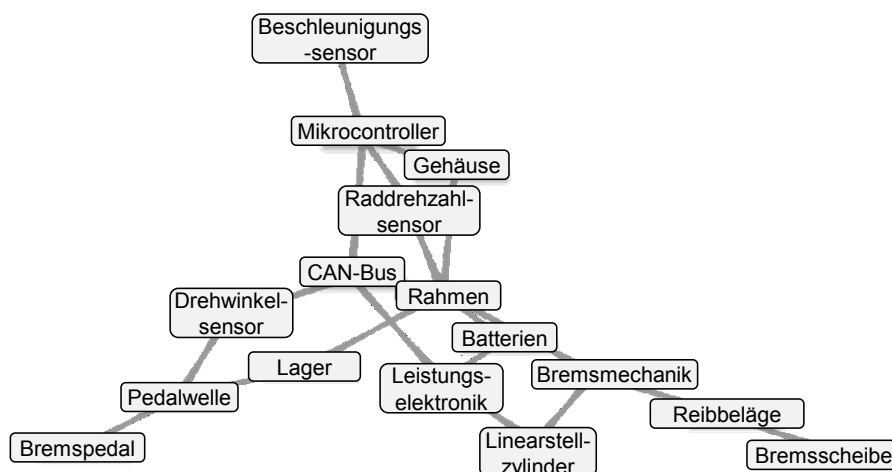


Bild 5-4: Graph der physikalischen Komponentenstruktur

Neben der physikalischen Komponentenstruktur werden in dieser Arbeit auch andere Systemstrukturen betrachtet. So beschreibt die funktionale Komponentenstruktur die Vernetzung von Komponenten aufgrund einer gemeinsamen Funktionserbringung, während die physikalische Funktionsstruktur eine Vernetzung von Funktionen aufgrund gemeinsam genutzter Komponenten beschreibt. Auf die unterschiedlichen im Rahmen der Prozessunterstützung mechatronischer Systeme betrachteten Strukturen sowie deren Interpretation wird in Kap. 5.5 eingegangen. Auf die übrigen Elemente und Strukturen des Systems wird im Folgenden genauer eingegangen, an dieser Stelle sollte lediglich das erstellte Funktionskonzept sowie die Architektur dargestellt werden.



## 5.2 Rahmenwerk und Systemmodell der funktionsorientierten Prozessplanung und Synchronisation

In diesem Kapitel wird das Rahmenwerk des Ansatzes mit den unterschiedlichen Elementen sowie deren Zusammenwirken dargestellt. Dies geschieht unter Verwendung der Allgemeinen Systemtechnik (vgl. Kap. 3.2.1) und grenzt die Bereiche Ziele, Handlungen und betrachtete Objekte voneinander ab. Im Anschluss erfolgt die Darstellung des Systemverständnisses des sozio-technischen Systems der mechatronischen Produktentwicklung. Dieses bildet die Grundlage für das Verständnis des Systems sowie die Modellierung im integrierten Produkt- und Prozessmodell. In ihm sind die wesentlichen Elemente sowie deren Relationen abgebildet und es dient als Grundlage zur Generierung eines Metamodells für die matrizenbasierte Modellierung.

### 5.2.1 Rahmenwerk der Prozessplanung und -synchronisation

Unter einem Rahmenwerk, auch als Rahmenkonzept bezeichnet, ist nach HOFER ein wiederverwendbares Design aus vorgefertigten Komponenten und Regeln zu deren Interaktion zu verstehen. Ein Rahmenwerk umfasst somit eine Zusammenstellung individueller Komponenten mit einem definierten Kooperationsverhalten, die zu einem spezifischen Anwendungsfall zusammengefügt werden. Es legt dadurch die Rollen und Beziehungen der Komponenten fest und stellt Wissen über ihre Zusammensetzung und ihr Zusammenwirken bereit [HOFER 2007, S.40F].

Die Darstellung des Rahmenwerks des entwickelten Ansatzes verwendet das Verständnis der Systemtheorie (siehe Kap. 3.2) zur Abgrenzung der einzelnen Bereiche. Dazu wird die Unterteilung der Unterstützung in ein Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem vorgenommen (vgl. ROPOHL 1975; EHRENSPIEL 2006, S.23FF). In diesem werden das Umfeld in dem der Ansatz entstanden ist, die zentralen Schwerpunkte der Unterstützung sowie das betrachtete Objekt in Beziehung gesetzt (siehe Bild 5-5). Der Ansatz umfasst im Wesentlichen die Elemente zur Erstellung eines integrierten Modells von mechatronischem Produkt und Prozess, die Planung des Entwicklungsprozesses, die entwicklungsbegleitende Analyse und Synchronisation des Prozesses sowie die Steuerung und Kontrolle des Entwicklungsprozesses [HELLENBRAND & LINDEMANN 2011].

Im **Zielsystem** werden die angestrebten Zielvorgaben festgehalten. Für den hier vorliegenden Anwendungsfall lassen sich diese in vier Kernelemente zusammenfassen. Ausgehend von einer funktionsorientierten Modellierung des sozio-technischen Systems soll eine transdisziplinäre Planung ermöglicht werden. Ergänzt um prozessbegleitende Maßnahmen soll dadurch eine verbesserte Synchronisation der Disziplinen erreicht werden. Dies wird ebenfalls durch die Erhöhung des Systemverständnisses unterstützt, welches eine weitere Zielsetzung darstellt. Zusammenfassend soll durch den Ansatz eine Steigerung der Effizienz und Effektivität erreicht werden. Für eine detaillierte Herleitung und Darstellung der Zielsetzung sowie die daraus abgeleitete Anforderungen sei auf Kap. 2.3 sowie Kap. 4.1 verwiesen.

Das **Handlungssystem** spiegelt die wesentlichen Bereiche der zur Zielerreichung eingesetzten Maßnahmen wieder. In diesem Fall werden Methoden und Hilfsmittel zur Prozesspla-

nung, Prozessanalyse sowie Prozesssteuerung und -kontrolle bereitgestellt. Diese kommen jeweils zu spezifischen Zeitpunkten zum Einsatz und betrachten unterschiedliche Aspekte des Systems. Die Prozessplanung findet nach der Konzeptfestlegung und vor der eigentlichen Durchführung des Prozesses statt und weist somit einen präskriptiven Charakter auf. Sie bildet somit die Sollvorgabe für die nachfolgende Prozessausführung. Parallel zur Ausführung des Prozesses finden die unterstützenden Maßnahmen zur Synchronisation sowie zur Steuerung und Kontrolle des Prozesses statt. Diese weisen somit einen deskriptiven Charakter auf. Grundlage für sämtliche entwickelte Maßnahmen zur Prozessunterstützung stellt ein Modell des mechatronischen Entwicklungsprozesses dar. Auf den Prozess wirken die einzelnen Methoden ein und gestalten ihn dadurch. Der Prozess bildet somit das Objektssystem.

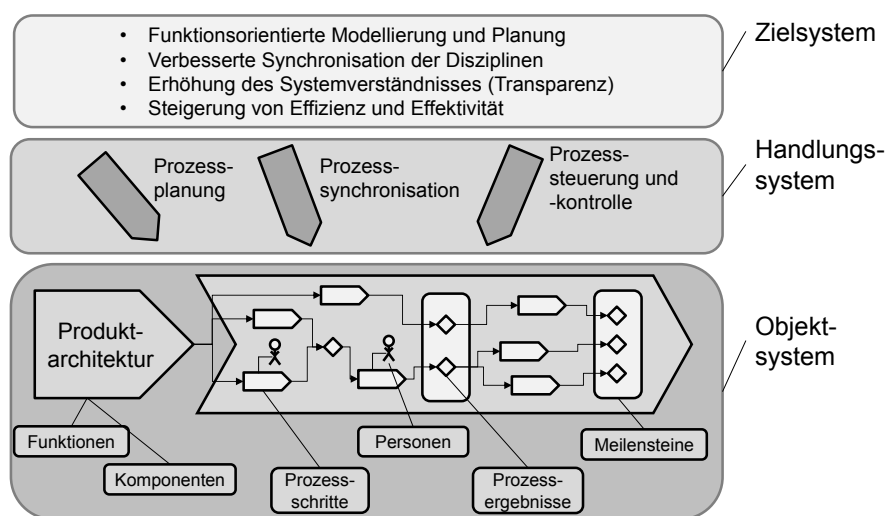


Bild 5-5: Rahmenwerk der funktionsorientierten Planung und Synchronisation  
[nach HELLENBRAND & LINDEMANN 2011]

Das betrachtete Objekt ist in diesem Fall der mechatronische Entwicklungsprozess mit der zugehörigen Produktarchitektur. Im **Objektsystem** sind in diesem Fall somit sowohl das technische Produkt, dargestellt durch seine Architektur, sowie der Entwicklungsprozess enthalten. Eine Unterscheidung zwischen einem Objektsystem und einem Prozesssystem ist in diesem Fall nicht notwendig und sinnvoll, da der Entwicklungsprozess das betrachtete Objekt darstellt an dem die entsprechenden Handlungen ausgeführt werden. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Produktarchitektur, die jedoch nicht aktiv verändert wird (vgl. Kap. 2.3).

Während das Handlungssystem die Unterstützungsfelder und deren zeitliche Einordnung darstellt, repräsentiert das Objektsystem die unterschiedlichen Elemente des Systems. Die Architektur des Systems wird über Funktionen und Komponenten wiedergegeben. Diese bildet somit ein Produktmodell ab. Der Entwicklungsprozess selbst besteht aus einer Abfolge von vernetzten Prozessschritten, die die Entwicklungsaktivitäten repräsentieren. Diese generieren einen Output in Form von Prozessergebnissen bzw. benötigen diese. Die Bearbeitung erfolgt durch Personen, die einem oder mehreren Prozessschritten zugeordnet werden können. Zu bestimmten Meilensteinen im Prozess müssen Ergebnisse zur Produktbeschreibung in Form von Prozessergebnissen vorliegen um die Meilensteine erfüllen zu können.

Einen zentralen Punkt bildet die integrative Betrachtung der Produktarchitektur sowie dem zugehörigen Entwicklungsprozess (siehe Kap. 2.2 sowie Kap. 5.1). Diese ist durch die Vernetzung von Entwicklungsprozess und Produktarchitektur dargestellt. Es wird im hier vorliegenden Modell davon ausgegangen, dass nur eine integrative Betrachtung von Produkt und Prozess sinnvoll ist. Jedoch wird die Architektur des Produktes als Eingangsgröße für die Prozessplanung verwendet und nur bedingt variabel angesehen.

Die verschiedenen Elemente und Relationen bilden eine Modellvorstellung des sozio-technischen Systems der mechatronischen Produktentwicklung. Diese werden im Folgenden in der Entwicklung eines Systemmodells dargestellt, in dem die einzelnen Elemente des Systems definiert sowie ihre Relationen dargelegt werden. Dieses Systemmodell bildet somit den zweiten Teil des Rahmenwerks der funktionsorientierten Prozessgestaltung mechatronischer Produkte.

## 5.2.2 Systemmodell der mechatronischen Produktentwicklung

Das sozio-technische System lässt sich mit der hier vorliegenden Zielsetzung über die sechs Domänen Funktionen, Komponenten, Prozessschritte, Prozessergebnisse, Meilensteine und Personen beschreiben (siehe Kap. 5.2.1). Hierzu wurde ein Systemmodell entwickelt, das die einzelnen Elemente und deren Relationen in einer abstrakten Darstellung beschreibt. Dies wird im Folgenden detailliert dargestellt.

Die Beschreibung des technischen Produktes erfolgt über **Funktionen**<sup>46</sup>. Diese Funktionen treten auf unterschiedlichen Ebenen und mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden auf. WARKENTIN weist darauf hin, dass in Funktionsbetrachtungen bei technischen Produkten zwischen Anwender- und Entwicklerperspektive unterschieden werden kann. Aus Anwendersicht beschreiben Funktionen ein gewünschtes oder erwartetes Verhalten eines Produktes. Die technische Perspektive des Entwicklers stellt hingegen die Verknüpfung der Eingangs- und Ausgangsgrößen mit der Zielsetzung der Aufgabenerfüllung in den Mittelpunkt [WARKENTIN 2010, S.9F]. Er unterscheidet daher zwischen den Begriffen *Funktion* und *technische Funktion*. In dieser Arbeit wird hingegen die Abgrenzung durch den Abstraktionsgrad getroffen. Auf den oberen Ebenen befinden sich vom Anwender bzw. Nutzer wahrnehmbare Funktionen, die wiederum das Zusammenwirken unterschiedlicher technischer Funktionen erfordern<sup>47</sup>. Die unterschiedlichen Funktionen des Systems können somit in Funktionshierarchien (vertikal) sowie in Funktionsnetzwerken (horizontal) miteinander verknüpft sein. Diese horizontale Vernetzung kann beispielsweise in Form von Stoff-, Energie- oder Informationsflüssen erfolgen (siehe Kap. 3.1.2). Eine weitere Form der Vernetzung besteht in der Betrachtung von abstrakteren Relationen. So kann eine Abhängigkeit ebenfalls ausdrücken, dass eine Funktion eine andere benötigt, beispielsweise aufgrund der Ausgangsgrößen der Funktion.

---

<sup>46</sup> Eine Funktion ist eine am Zweck orientierte, lösungsneutrale, als Operation beschriebene Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems. Funktionen werden durch Kombination eines Substantivs und einem Verb beschrieben [LINDEMANN 2009, S.331].

<sup>47</sup> Eine detaillierte Betrachtung unterschiedlicher Funktionen in mechatronischen Produkten sowie deren hierarchische Beziehungen erfolgt in Kap. 5.3 sowie Kap. 5.5.2.

Die Elemente bzw. Bauteile des technischen Systems werden über **Komponenten** im Modell abgebildet. Sie sind die einzelnen Bausteine, aus denen das reale, physische mechatronische Produkt besteht. Der Begriff Komponente umfasst nach dem hier vorliegenden Verständnis sowohl stoffliche Bauteile und Baugruppen wie auch nichtstoffliche Elemente wie Softwareprogramme bzw. -code. Dies ist notwendig, da mechatronische Produkte einen erheblichen Anteil an nichtstofflichen Elementen aufweisen und ihre Eigenschaften wesentlich durch diese festgelegt bzw. beeinflusst werden. Der Begriff Komponente wird hier analog zur Verwendung in SysML (siehe Kap. 3.2.3) gebraucht. Die Komponenten sind Träger der Funktionen und realisieren die (technischen) Funktionen des Systems. Sie können ebenfalls untereinander über hierarchische Strukturen (Komponenten, Baugruppen) sowie auf einer Abstraktionsebene (Wirkstruktur) miteinander vernetzt sein. Die Komponenten beschreiben somit die Wirkstruktur des Produktes. Die Beziehung zwischen Komponenten und Funktionen kann eine Komponente zu ein oder mehreren Funktionen beitragen und umgekehrt (n:m Beziehung).

Die zentralen Elemente des Entwicklungsprozesses stellen **Prozessschritte** dar. Diese werden auch als Aktivitäten oder Arbeitspakete bezeichnet (siehe Kap. 3.4.1). Sie stellen in sich geschlossene Aufgabenpakete zur Entwicklung bzw. Konkretisierung des technischen Produktes dar. Sie sind untereinander über Informationsflüsse vernetzt, die Eingangs- und Ausgangsinformationen darstellen. Es können ebenfalls unterschiedliche Abstraktionsebenen (horizontale Struktur) sowie die Vernetzung untereinander (vertikale Struktur) betrachtet werden (siehe Kap. 3.4.1). Die Eingangs- und Ausgangsgrößen sind Prozessergebnisse, die verarbeitet bzw. erzeugt werden. Über Vorgänger-/ Nachfolgerbeziehungen können sie ebenfalls untereinander vernetzt sein. Die konkrete Ausgestaltung der Prozessschritte kann beispielsweise in Form von Prozessbausteinen erfolgen, die zur flexiblen Beschreibung des Prozessnetzwerks auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen verwendet werden [vgl. BICHLMAIER 2000].

Der Informationsfluss bzw. -austausch zwischen den Prozessschritten erfolgt über **Prozessergebnisse**. Dabei handelt es sich um jede Form von Wissen bzw. Information über das Produkt, das im Verlauf der Konkretisierung entsteht. Die Prozessergebnisse beschreiben die Komponenten und bilden in ihrer Gesamtheit sowie Ausprägung den aktuellen Entwicklungsstand des technischen Systems ab. Sie dienen somit als Eingangsinformationen für bestimmte Prozessschritte bzw. werden im Prozessverlauf als Ausgangsinformationen erzeugt. Es handelt sich somit um jede Art von Dokument oder Artefakt, das über das Produkt erstellt wird. Prozessergebnisse können somit Anforderungslisten, Funktions- oder Berechnungsmodelle sowie physische und virtuelle Prototypen sein. Die Prozessergebnisse werden zu bestimmten Zeitpunkten (z. B. Meilensteinen) im Prozess benötigt.

Die Grobstrukturierung des Prozesses erfolgt über **Meilensteine**. An diesen Meilensteinen werden typischerweise Integrations- und Absicherungsaktivitäten durchgeführt. Somit müssen zu Meilensteinen im Prozess bestimmte Prozessergebnisse in einem bestimmten Konkretisierungsgrad (Entwicklungsstand) vorliegen, um Funktionen abprüfen zu können. Meilensteine stellen einzelne Ereignisse bzw. Zeitpunkte im Prozess dar und können zur Einteilung in Phasen verwendet werden. Meilensteine selbst weisen im Allgemeinen keine Dauer auf sondern sind singuläre Punkte. Nach anderen Auffassungen können Meilensteine selbst wieder bestimmte Teilprozesse enthalten und somit einen Dauer umfassen. Nach dem hier vorliegenden

Verständnis besitzen Meilensteine keine Zeitdauer sondern erfordern das Vorliegen von bestimmten Prozessergebnissen. Sie sind somit als Quality Gates<sup>48</sup> ausgeführt.

Ein weiteres Element stellen **Personen** dar, die im Prozess unterschiedliche Rollen und Aufgaben übernehmen können. Zum einen treten sie als Bearbeiter und Verantwortliche für die Prozessschritte auf, die die Entwicklung bzw. Konkretisierung des Produktes durchführen. Weiterhin können sie auch als Verantwortliche, im Sinne von Projektleitern oder Freigabeberechtigten für Komponenten bzw. Funktionen, auftreten. Ebenso sind Mischformen möglich, in denen Entwickler Komponenten bearbeiten und gleichzeitig verantworten. Analog kann dies auch bei Funktionen auftreten.

Eine grafische Darstellung des Systemmodells mit den enthaltenen Elementen sowie deren Relationen zeigt Bild 5-6. Durch die Pfeile ist jeweils die Richtung der Relation dargestellt.

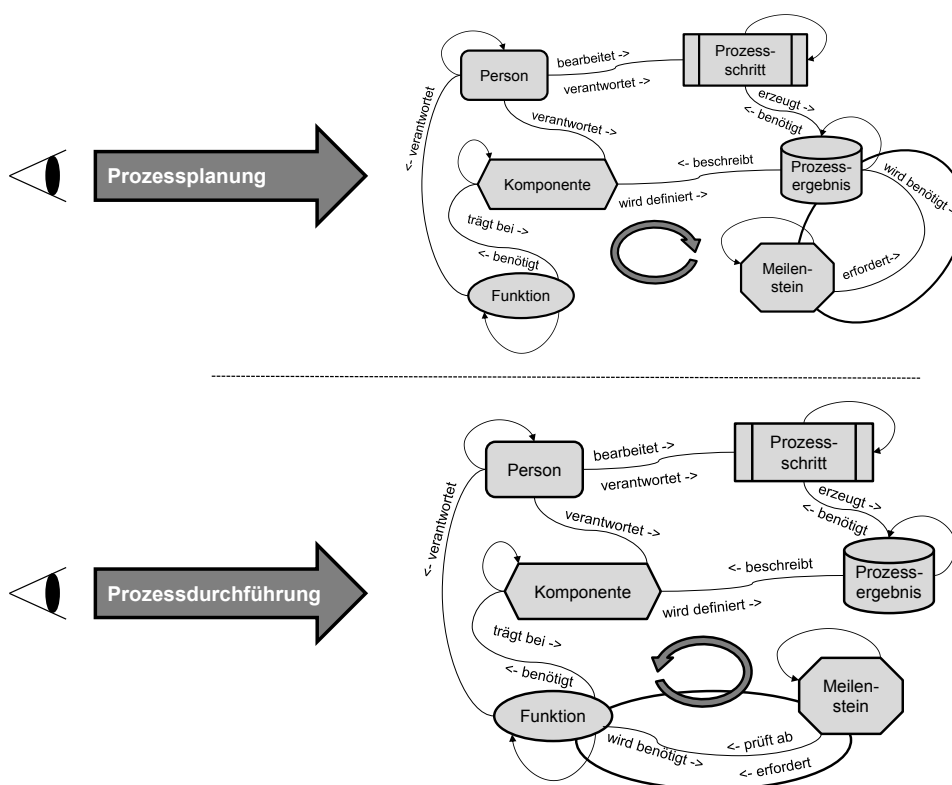


Bild 5-6: Unterschiedlichen Perspektiven der Prozessplanung sowie der Prozessdurchführung auf die Elemente und Relationen im betrachteten System

Mit Hinblick auf die Unterstützung der Prozessplanung und Synchronisation der mechatronischen Entwicklungsprozesse können zwei Perspektiven unterschieden werden. Diese unterscheiden sich je nach eingesetztem Zeitpunkt des Ansatzes. Hierbei werden unterschiedliche Sichtweisen auf die Relationen sowie deren logische Abhängigkeiten im System eingenommen.

<sup>48</sup> Unter einem Quality Gate wird ein ergebnisorientierter Zeitpunkt verstanden, der durch produkt- bzw. prozessspezifische Inhalte und Leistungen definiert wird [WIBLER 2006, S.45].

In der **Prozessplanung** (präskriptiv) wird von einer bestehenden Produktarchitektur sowie von zu erbringenden Systemfunktionen aus Kundensicht (Gesamtfunktionalität) auf die Ableitung einer Prozessstruktur geschlossen. Daher bilden Funktionen sowie deren Überprüfung den Ausgangspunkt der Betrachtungen. Von den Funktionen sowie deren Vernetzung kann auf den Entwicklungsstand der zu ihrer Überprüfung notwendigen Dokumente geschlossen werden. Diese wiederum bestimmen die Ausprägung der mit ihnen verknüpften Prozessergebnisse. Aus der Zusammenfassung von spezifischen Prozessergebnissen mit spezifischer Ausprägung können so Meilensteine festgelegt werden (Bild 5-6 oben).

Im Verlauf der **Prozessdurchführung** können die Funktionen nicht direkt zur Steuerung und Kontrolle des Prozesses verwendet werden, da es sich um abstrakte Beschreibungsformen des Systems handelt. Sie stellen eine aggregierte Sicht auf das vernetzte Zusammenwirken unterschiedlicher Komponenten des technischen Systems dar. Die reine Betrachtung von Funktionen ist somit aus Sicht einer Prozesssteuerung nicht ausreichend, da detaillierte Informationen benötigt werden. Im Verlauf des Prozesses besteht lediglich der Zugriff auf den aktuellen Status von Arbeitspaketen und Prozessergebnissen. Aus dem Stand der Prozessergebnisse kann jedoch auf den Stand der Komponenten und deren Struktur geschlossen werden. Das Zusammenwirken der Komponenten in ihrer Struktur bestimmt den Entwicklungsstand der Funktionen. Dieser wurde in der Prozessplanung festgelegt und kann somit als Kriterium für die Entscheidung zur Erfüllung eines Meilensteines herangezogen werden (Bild 5-6 unten).

### 5.3 Funktionsorientierte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse

Aus dem dargestellten Systemverständnis des sozio-technischen Systems der Produktentwicklung ergeben sich Konsequenzen für die Gestaltung der mechatronischen Entwicklungsprozesse insgesamt. Wie in Kap. 2.3 detailliert hergeleitet, ist für die mechatronische Entwicklung eine starke Funktionsorientierung anzustreben. Auf diese Weise kann ein gemeinsames Verständnis der Entwicklung und des Systems geschaffen werden, das eine Voraussetzung für die Synchronisation der unterschiedlichen Domänen darstellt.

Die **Entwicklung und Realisierung von Funktionen** stellen somit den zentralen Punkt in der Entwicklung dar. Aus diesem Grund muss auch die Gestaltung des Prozesses von den Funktionen ausgehen und entsprechend realisiert werden. Die entwickelten Komponenten dienen lediglich als Mittel zum Zweck. Auf diese Weise kann auch der Anforderung entsprochen werden, dass die vorhandenen und etablierten Prozesse in den einzelnen Disziplinen beibehalten werden können. Die Entwicklung und Gestaltung einzelner Komponenten erfolgt nach den bewährten Vorgehensmodellen und Prozessen, die Synchronisation der Teilprozesse findet über eine hierarchische Funktionsbetrachtung statt. Diese kann grundsätzlich auf jede Art von inter- bzw. transdisziplinären Prozessen übertragen werden und ist nicht auf die Betrachtung von Mechatronik limitiert.

Zur zentralen Planung und Synchronisation der Teilprozesse werden daher die Aktivitäten zur Integration und Absicherung als Ausgangspunkte für die Prozessplanung und -synchronisation verwendet. Die Schritte zur funktionalen Absicherung erfordern die effektive Synchronisation der disziplinspezifischen Prozesse und der notwendigen Prozessergebnisse

se zur Erfüllung der vorgegebenen Anforderungen (mechatronische Gesamtfunktionen) zu einem gewissen Zeitpunkt. Wie in Kap. 2.2 dargelegt, entstehen die meisten Probleme in den Phasen der Integration und Absicherung bzw. werden dort entdeckt. Die Ursachen für die Probleme liegen hingegen typischerweise in der Phase des domänenspezifischen Entwurfs, in denen eine ungenügende Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen den Disziplinen vorliegt. Aus diesen Gründen ist die Integrationsphase ein geeigneter Ausgangspunkt für die Prozessplanung und die Synchronisation der Disziplinen [BRAUN et al. 2007a].

Das entwickelte Modell eines **funktionsgetriebenen Entwicklungsprozesses** folgt somit dem Grundsatz der funktionsgetriebenen Entwicklungsprozessplanung und enthält unterschiedliche Abstraktionsebenen (siehe Bild 5-7). Auf der höchsten Abstraktionsebene befinden sich mechatronische Systemfunktionen (Top-Level) bzw. Kundenfunktionen<sup>49</sup>. Am Beispiel des Go-Karts stellt die Funktion „Fahrzeug kontrolliert abbremst“ eine solche Gesamtfunktion dar. Zur Realisierung bzw. Entwicklung einer mechatronischen Kundenfunktion (große, helle Pfeile) sind ein oder mehrere Teilfunktionen (mittlere, dunkle Pfeile) erforderlich. Diese müssen in einer bestimmten Art und Weise zusammen wirken um die übergeordnete Funktion zu realisieren. Im Beispiel gehören hierzu die Regelung der Fahrdynamik, die Erzeugung des Bremsmomentes oder das Erkennen des Fahrerwunsches. Diese Teilfunktionen können je nach Funktionalität, Umfang und Komplexität des Systems weiter in weitere Ebenen untergliedert werden. Auf unterster Ebene der Funktionshierarchie befinden sich technische Funktionen (nicht dargestellt), die von ein oder mehreren Komponenten (Hardware, Software, Elektrik/Elektronik) realisiert werden (kleine, dunkle Pfeile). Analog zu den Funktionen müssen die Komponenten des mechatronischen Systems zur Erfüllung der jeweiligen Funktionen in definierter Art und Weise zusammenwirken. Die einzelnen Komponenten können dabei jeweils zu ein oder mehreren Funktionen beitragen, umgekehrt kann durch eine Funktion eine oder mehrere Komponenten realisiert werden (n:m Verknüpfungen).

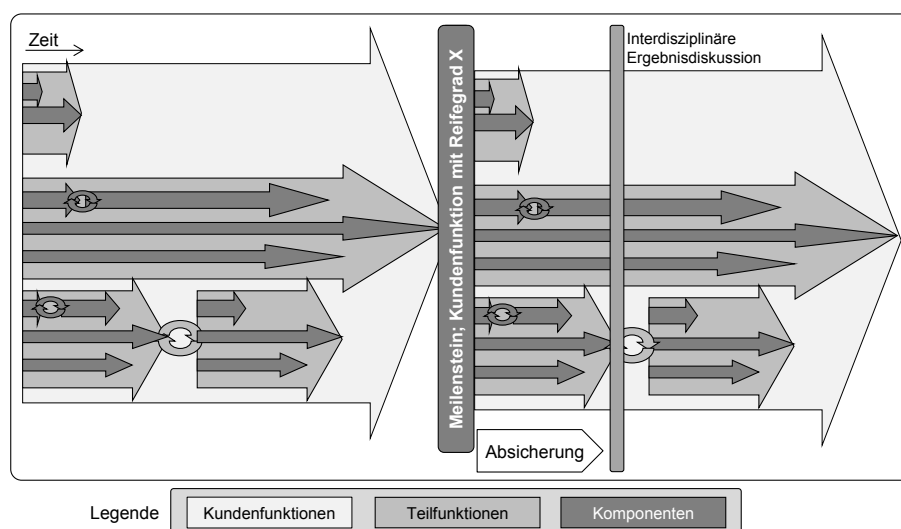


Bild 5-7: Funktionsorientierte Entwicklung mechatronischer Produkte [nach HELLENBRAND et al. 2010]

<sup>49</sup> Eine differenzierte Betrachtung und Hierarchisierung des Funktionsbegriffs für mechatronische Produkte findet sich in Kap. 5.5.2.

Die Entwicklung auf sämtlichen Abstraktionsebenen findet nicht rein linear sondern zyklisch statt. Die Funktionen werden somit in der Regel in mehreren Iterationsschleifen auf einen bestimmten Entwicklungsstand (Reifegrad) gebracht. Diese Zyklen können aufgrund der Notwendigkeit einer detaillierteren Erkundung, Konzentration, Verfeinerung, Wiederholarbeit, Wiederholung bzw. Verhandlung von Tätigkeiten entstehen [vgl. WYNN et al. 2007; LANGER et al. 2011]. Diese Zyklen bzw. Iterationen im Prozess finden auf unterschiedlichen Ebenen und mit unterschiedlichen Längen und Inhalten statt (Kreise zwischen den Pfeilen).

Zur Gliederung des Prozesses werden häufig Phasen im Prozess eingeführt (vgl. Kap. 5.1). Diese Untergliederung kann sowohl mit Hinblick auf Komponenten sowie Funktionen durchgeführt werden. Nach dem Verständnis der funktionsorientierten Prozessgestaltung dienen Meilensteine als Abschluss von Funktionsentwicklungen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Diese dienen somit neben der Gliederung des Entwicklungsprozesses zur Synchronisation von Entwicklungsständen, Aktivitäten und dem weiteren Vorgehen (vgl. z. B. GEISBERGER & SCHMIDT 2005; HASKINS 2010, S.22f). Die Meilensteine können dabei in Form von Reviews, Decision Gates oder Quality Gates durchgeführt werden. Zentral im hier eingenommenen Verständnis ist die Durchführung eines transdisziplinären Austausches über den aktuellen Entwicklungsfortschritt. In der Phase der Integration stellen sie Zeitpunkte zur Integration disziplinübergreifender Entwicklungsartefakte dar.

Aus Perspektive der funktionsorientierten Gestaltung und Planung mechatronischer Entwicklungsprozesse stellen Meilensteine Zeitpunkte im Prozess zur Überprüfung eines definierten Entwicklungsstandes von Funktionen dar. Hierbei werden in der Regel Kundenfunktionen überprüft, da diese die Aggregation mehrere Funktionsebenen und deren Vernetzung abbilden und gleichzeitig die Funktionalität des Systems aus Anwendersicht widerspiegeln. Die Erfüllung bzw. der erfolgreiche Abschluss eines Meilensteines erfordert die Umsetzung sämtlicher untergeordneter Funktionen, die einen definierten Entwicklungsstand erreicht haben müssen.

In Serienentwicklungsprozessen werden zentrale Meilensteine typischerweise durch transdisziplinäre Integrations- und Absicherungsaktivitäten auf den abstrakten Ebenen (Kundenfunktion, Systemfunktion) definiert (siehe Bild 5-7). Konsequenterweise werden die Integration und Absicherung analog zu den Kundenfunktionen auch auf den unteren Funktionsebenen sowie auf Komponentenebene durchgeführt. Zusätzlich zu domänenübergreifenden Absicherungsaktivitäten finden disziplinspezifische Absicherungen und Tests, sowie disziplininterner und -übergreifender Austausch über den Entwicklungsfortschritt statt. Diese können sowohl geplant wie auch bedarfsinduziert stattfinden. Dieser quasikontinuierliche Ergebnisaustausch sowie die damit verbundenen Zusammensetzung der interdisziplinären Entwicklerteams (Kommunikationsstruktur), sind von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Erfüllung von Meilensteinen sowie einem effizienten Prozessdurchlauf.

Eine Herausforderung in der Entwicklung ist die zeitliche Dauer der Integrations- und Absicherungsaktivitäten. So nehmen beispielsweise der Bau von Prototypen oder aufwendige Simulationen eine gewisse Zeitspanne in Anspruch. Anschließend ist zumeist noch eine Auswertung der Daten sowie im Falle von Fehlern eine Analyse erforderlich. Die Meilensteine stellen somit definierte Zeitpunkte im Prozess dar, nehmen selbst jedoch keine Zeit in Anspruch. Sie bilden somit nur ein Ereignis; der Entwicklungsprozess und die nachfolgenden Aktivitäten laufen weiter. Die Ergebnisse der Integrations- und Absicherungsaktivitäten müs-



sen jedoch in den laufenden Entwicklungsprozess eingespeist werden. Im Fall von erfolgreichen Funktionsprüfungen ist diese kein Problem, im Fall von fehlgeschlagenen Tests müssen jedoch die richtigen Personen bzw. Abteilungen benachrichtigt und in die interdisziplinäre Ergebnisdiskussion einbezogen werden.

Das Modell des mechatronischen Entwicklungsprozesses umfasst nach dem hier dargestellten Verständnis einer funktionsorientierten Entwicklung somit drei zentrale Domänen. Eine zentrale Stellung nehmen die Prozessschritte (Entwicklungsaktivitäten) ein. Die Struktur des Prozesses wird über die Verknüpfung der Prozessschritte sowie der Meilensteine abgebildet. Eine dritte Domäne bilden Personen (Entwickler), die den Prozessschritten als Bearbeiter zugeordnet werden können. Weitere relevante Domänen im Prozessmodell sind Verantwortlichkeiten, die für Komponenten und Funktionen auftreten können. Die Verantwortlichkeiten können sich dabei von den Bearbeitern der Prozessschritte unterscheiden. Auf die besondere Stellung der Prozessergebnisse bzw. Artefakte (Dokumente, Prototypen, Modelle) wird in Kap. 5.5.2 eingegangen.

## 5.4 Vorgehensmodell der funktionsorientierten Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse

In der Einleitung dieses Kapitels wurde bereits der grundlegende Aufbau der entwickelten Methodik dargelegt (siehe Kap. 5.1). Das entwickelte **Vorgehensmodell** stützt sich dabei auf einen Referenzprozess, der zugleich das Standardvorgehen widerspiegelt (siehe Bild 5-8). Wie beschrieben, ist das Standardvorgehen in die drei Phasen Modellbildung, Prozessplanung sowie Prozessdurchführung gegliedert. Die durchzuführenden Tätigkeiten sowie zugehörige Werkzeuge und Hilfsmittel werden durch entsprechende Module unterstützt. Entsprechend den Unterstützungsschwerpunkten des Ansatzes existieren Module für Modellierung, Planung, Synchronisation, Steuerung und Kontrolle. In jedem Modul existieren Vorgehensschritte, die bestimmte Tätigkeiten umfassen. Im Folgenden wird das Vorgehensmodell mit dem Standardvorgehen zusammenfassend dargestellt.

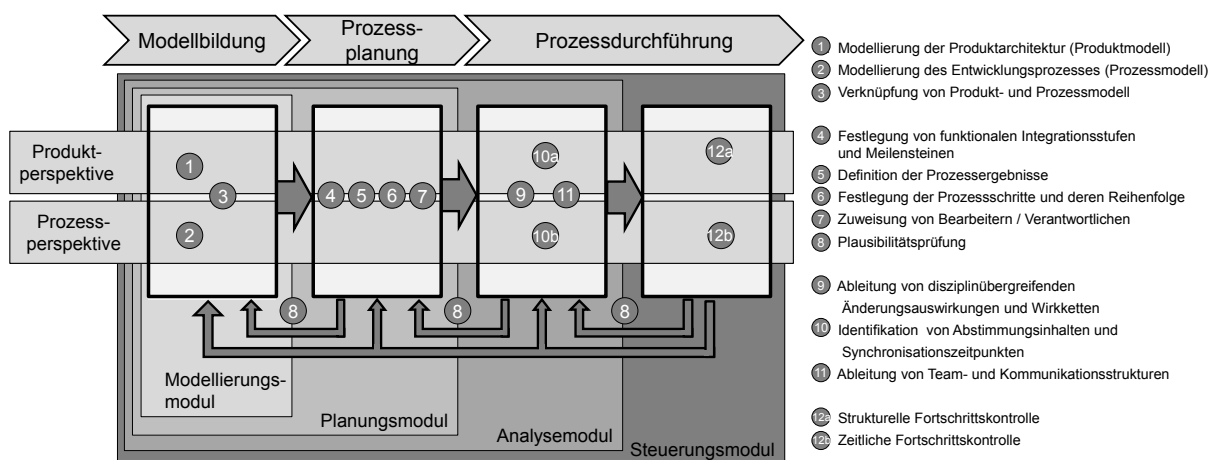


Bild 5-8: Vorgehensmodell zur Unterstützung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse

Durch die Reihenfolge der Nummerierung der Schritte wird ein **Standardvorgehen** beschrieben, die Module lassen sich jedoch auch teilweise unabhängig voneinander einsetzen. Durch die verschachtelte Darstellung sind die Abhängigkeiten bzw. eine hierarchische Beziehung zwischen den Modulen dargestellt. Das Modellierungsmodul bildet die Grundlage der anderen Analysen, ist somit zwingend zu einem gewissen Grad immer erforderlich. So erfordert das Planungsmodul ein Systemmodell bzw. trägt dazu bei, dieses zu ergänzen und zu komplementieren. Das Analysemodul benötigt wiederum ein ausgefülltes Produkt- und Prozessmodul, mit dem die Analysen durchgeführt werden können. Ebenso benötigt das Steuerungsmodul einen bestehenden Prozessplan zum Abgleich zwischen Soll- und Ist-Stand der Entwicklung. Durch die Zuordnung zur Produkt- bzw. Prozessperspektive wird verdeutlicht, ob der entsprechende Schritt eher auf Produkt- bzw. Prozessaspekte ausgerichtet ist.

Analog zur Prozessdurchführung findet die Durchführung des Ansatzes nicht rein linear statt, sondern ist von Iterationen geprägt. Dies ist zum einen im Vorgehen selbst begründet, das eine zunehmende Konkretisierung und Plausibilitätsprüfung mit mehreren Iterationsschleifen vorsieht in denen Änderungen am Modell vorgenommen werden. Weiterhin ist es auf die hohe Dynamik des Entwicklungsprozesses selbst zurückzuführen (vgl. Kap. 3.4), die eine rollierende Anpassung an die sich verändernden Situationen im Entwicklungsprozess erfordert. Es ergeben sich somit Rücksprünge in die früheren Phasen (siehe Bild 5-8).

### **Beschreibung der Module und des Standardvorgehens**

Als Eingangsinformationen für die Modellbildung dient wie beschrieben ein in der vorgelagerten Phase des domänenübergreifenden Systementwurfs entwickeltes Produktkonzept. Dieses **Produktmodell** wird durch seine Architektur, bestehend aus Komponenten und Funktionen (Kap. 3.2.2), repräsentiert. Damit können zunächst die Funktions- sowie die Komponentenstruktur in der Matrix abgebildet werden (*Schritt 1*). Weiterhin können über die Verknüpfung von Funktionen und Komponenten sowohl die physikalische Funktionsstruktur wie auch die funktionale Komponentenstruktur (siehe Kap 3.3.3) abgeleitet werden.

Weiterhin kann das **Prozessmodell** mit den Domänen Prozessschritte, Personen und Meilensteine erstellt werden (2). Hierbei hängt es von der Aufgabenstellung und den Rahmenbedingungen ab, ob zunächst ein bis auf die Domänen leeres Modell (keine Elemente und Relationen) erzeugt wird, oder ob ein bereits vorhandener Prozess abgebildet werden soll. Abhängig davon entscheidet sich, welche der Partialmodelle bereits befüllt werden können und welche in späteren Schritten ergänzt werden. Der letzte Schritt besteht in der **Verknüpfung der beiden Partialmodelle** über die Prozessergebnisse (3). Somit liegt das integrierte Systemmodell der mechatronischen Produktentwicklung vor.

Zu Beginn der Planung erfolgt die Identifikation von funktionalen Integrationsstufen und Tests sowie daraus abgeleitet die **Definition von Meilensteinen** (4). Als Basis dienen hierfür die physikalische Funktionsstruktur, die Wirkungs-Funktionsstruktur (siehe Kap. 5.5.2) sowie die Funktionshierarchie. Aus der Analyse von Merkmalen und Charakteristika dieser Strukturen kann die Grobstruktur (Phasen) des Entwicklungsprozesses abgeleitet werden.

Mit der Festlegung der Meilensteine können über die Verknüpfung mit der Komponentenstruktur sowie dem erforderlichen Entwicklungsfortschritt die zur Erfüllung der Meilensteine notwendigen **Prozessergebnisse** sowie deren Ausprägung festgelegt werden (5). Daraus kön-

nen die zur Erstellung der Prozessergebnisse notwendigen **Prozessschritte** sowie deren Reihenfolge abgeleitet werden (6).

Auf dieser Grundlage erfolgt anschließend die **Zuordnung von Bearbeitern** zu den einzelnen Prozessschritten (7). Je nach Ausprägung der Organisation ist weiterhin eine Zuweisung von Verantwortlichen für Funktionen und Komponenten möglich. Die Verantwortlichen können dabei mit den Bearbeitern übereinstimmen, jedoch ist dies nicht zwingend erforderlich.

Damit liegt ein erster Entwurf für den Prozessplan vor, der anschließend einer **Plausibilitätsprüfung** unterzogen wird (8). Dazu werden Abhängigkeiten in der Produktarchitektur sowie zeitliche Abhängigkeiten analysiert. In einem iterativen Prozess wird der Prozessplan angepasst, bis eine konsistente Planung mit optimaler Synchronisation vorliegt. Zugleich kann dieser Schritt auch zur rollierenden Planung bzw. Konkretisierung im Prozessverlauf verwendet werden.

Im vollständig befüllten Modell können anschließend verschiedenen Analysen zur Unterstützung der transdisziplinären Zusammenarbeit durchgeführt werden. So können sowohl auf Produkt wie auf Prozessseite **Änderungsauswirkungen sowie die zugehörigen Wirkketten** dargestellt und untersucht werden (9). Aus der Produktarchitektur und der Prozessstruktur können **Abstimmungsinhalte und Synchronisationszeitpunkte** abgeleitet werden (10). In der kombinierten Betrachtung von Bearbeitern/Verantwortlichen sowie der Produktarchitektur besteht die Möglichkeit zur phasenspezifischen **Ableitung von Team und Kommunikationsstrukturen** (11).

Zur Fortschrittkontrolle sind eine Betrachtung des aktuellen Entwicklungsstands und der Vergleich mit dem Soll-Prozessplan erforderlich. Dabei kann der **Entwicklungsstand des Produktes** (Produktreife) auf struktureller Ebene durch Analyse von Funktions-, Komponenten- und Prozessergebnisstruktur abgebildet werden (12a). Eine Aussage zum **zeitlichen bzw. terminlichen Prozessfortschritt** kann über die Analyse der Struktur der Prozessschritte erfolgen (12b).

Aus der Beschreibung des generellen Vorgehens wird deutlich, dass eine Unterstützung der einzelnen Schritte durch eine Beschreibung sowie zugehörige Methoden und Hilfsmittel erforderlich ist. Daher wurde eine Erläuterung für alle zwölf Schritte des Vorgehensmodells erstellt und mit einer beispielhaften Anwendung versehen. Ein Auszug aus dem Vorgehensmodell ist in Bild 5-9 dargestellt. Das vollständige Vorgehensmodell mit allen Schritten ist in Kap. 9.6 im Anhang dieser Dissertation zu finden.

Die Beschreibungen der einzelnen Schritte umfassen neben der Identifikationsnummer zur Einordnung in den Gesamtprozess eine kurze Darstellung des Vorgehens, der verwendeten Hilfsmittel sowie falls erforderlich weitere Hinweise auf die Literatur. Darüber hinaus ist die entsprechende Modellbildung beispielhaft dargestellt.

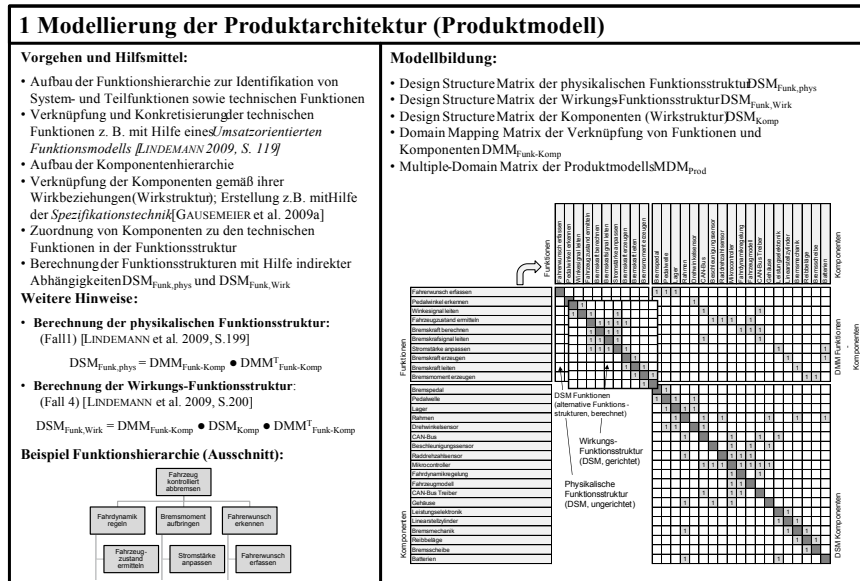


Bild 5-9: Auszug aus der Beschreibung der Schritte des Vorgehensmodells

## 5.5 Integrierte Produkt- und Entwicklungsprozessmodellierung

Die Grundlage für die präskriptive Prozessplanung sowie die entwicklungsbegleitende Synchronisation des Entwicklungsprozesses bildet ein integriertes Modell des mechatronischen Produktes sowie des Entwicklungsprozesses. Zur Modellierung und Analyse dieses sozio-technischen Systems wird eine Multiple-Domain Matrix (MDM) (siehe Kap. 3.3.2) verwendet. Diese MDM bildet die Basis für die verwendeten Methoden zur Unterstützung der Planung und Analyse mechatronischer Entwicklungsprozesse.

Zunächst wird das Metamodell zur Abbildung des Systemmodells in Matrizenform dargestellt. Im Anschluss werden der Aufbau der einzelnen Partialmodelle (Teilmatrizen) sowie deren Verknüpfung dargelegt. Den Abschluss bilden eine Betrachtung der Datenakquisition sowie die Möglichkeiten zur Interpretation und Analyse des Modells im hier betrachteten Kontext mechatronischer Produktentwicklungsprozesse.

Zur Erstellung, Analyse und grafischen Visualisierung des integrierten Systemmodells wurde das Tool „Loomeo“ der TESEON GmbH in der Version 2.4 verwendet [TESEON 2012], welches auf Forschungsarbeiten des Lehrstuhls für Produktentwicklung beruht. Es handelt sich dabei um ein Werkzeug zur Unterstützung des strukturellen Komplexitätsmanagements. Die entwickelte Methodik kann grundsätzlich auch mit anderen Tools ähnlicher Funktionalität unterstützt werden.

### 5.5.1 Metamodell der integrierten Produkt- und Prozessmodellierung

Der erste Schritt im Vorgehen des strukturellen Komplexitätsmanagements (siehe Kap. 3.3.1), besteht aus der Definition des Systems in Form eines **Metamodells**. Ein entsprechendes Sys-

temmodell wurde in Kap 5.2.2. entwickelt und dargestellt. Diese muss daher mit Hilfe eines geeigneten Metamodells in eine Multiple-Domain Matrix (MDM) übertragen werden.

Die Gründe für die Verwendung eines **MDM-basierten Systemmodells** wurden in Kap. 3.3.3 bereits angesprochen. Eine wesentliche Eigenschaft ist, dass sich mit diesem die Struktur von Systemen mit unterschiedlichen Element- und Relationsarten in einem Modell abbilden lassen. Dies ist vor allem im Kontext der Entwicklung mechatronischer Produkte relevant, da somit unterschiedliche Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Disziplinen gleichzeitig abgebildet und analysiert werden können.

Die wesentlichen Gründe für die Verwendung eines MDM-basierten Systemmodells sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst:

Tabelle 5-1: Gründe für die Verwendung eines MDM-basierten Systemmodells

<b>Gründe für ein MDM-basiertes Systemmodell</b>
Es können unterschiedliche Element- und Relationsarten in einem übergreifenden Modell abgebildet werden. Somit können Abhängigkeiten innerhalb sowie domänenübergreifend modelliert und analysiert werden. In der Mechatronik ist dies vor allem für die Betrachtung disziplinübergreifender Relationen relevant
Das Modell gestattet die gleichzeitige Darstellung von statischen und dynamischen Strukturen. Diese ermöglicht die integrative Betrachtung von Produktarchitektur (Funktionen, Komponenten) und Prozessstruktur (Prozessergebnisse, Prozessschritte, Meilensteine, Personen) sowie deren domänenübergreifende Abhängigkeiten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.
Es können Abhängigkeiten zwischen den Elementen aufgrund unterschiedlicher Relationsarten abgebildet werden.
Eine rein qualitative Analyse von Strukturen ist möglich, was die Modellierung erleichtert und auch die Abbildung abstrakter bzw. unbekannter Relationsarten gestattet („kann beeinflussen“).
Es besteht die Möglichkeit zur Quantifizierung des Modells und damit zur Unterscheidung verschiedener Relationsarten oder zur Modellierung der Stärke von Abhängigkeiten
Der Ansatz ermöglicht die Kombination unterschiedlicher Perspektiven in einem Modell (funktions- und komponentenorientiert). Es ermöglicht darüber hinaus einen Wechsel zwischen Funktions- und Bauteilsicht sowie deren integrative Analyse.
Die abstrakte, strukturelle Sichtweise ist domänenunabhängig und kann disziplinübergreifend verstanden werden. Die Modellierung von Prozessen und nahezu verlustfreie Abbildung bekannter Prozessmodelle in MDMs zeigt [KREIMEYER 2010, S.105FF]. Durch die Fokussierung auf die Struktur des Prozesses werden alle unnötigen Informationen ausgeblendet.
Es stehen sämtliche Analyse- und Berechnungsmöglichkeiten für DSM, DMM und MDM zur Verfügung. Weiterhin können Kennzahlen und Strukturcharakteristika verwendet werden sowie indirekte Abhängigkeiten und aggregierte Sichtweisen berechnet werden. Daraus ergeben sich diverse strukturelle Analyse- und Optimierungsmöglichkeiten.
Die Analyse kann aufgrund nativer (erhobener, aufgenommener) oder berechneter Daten erfolgen. Dies ist vor allem hilfreich, wenn die erforderlichen Daten einer Domäne nicht oder nur sehr aufwändig erhoben werden können.
Einfache grafische Darstellung und Analyse des Systems mit Hilfe von dynamischen Graphen.
Einfache Darstellung im Rechner und dadurch einfache Implementierbarkeit in einem Tool.

Das Systemmodell besteht in seinem Grundaufbau aus den abzubildenden Elementen, die in den Zeilen und Spalten des MDM-Modells angeordnet sind. Jede Art von Element bildet dabei eine eigene Teilmatrix (Domäne). Die Domänen sind dabei im Produktmodell die Funktionen und Komponenten, im Prozessmodell werden die Prozessschritte, Prozessergebnisse, Personen und Meilensteine abgebildet (siehe Kap. 5.2.2). Die Relationen zwischen den Elementen werden in den entsprechenden Teilmatrizen modelliert. Die Einträge in den einzelnen Teilmatrizen repräsentieren somit unterschiedliche Relationsarten, die separat und gemischt in einem Systemmodell vorkommen können (siehe Bild 5-10).

Die Darstellung zeigt die möglichen Relationsarten innerhalb der unterschiedlichen Teilmatrizen. Auf der Diagonalen des Modell sind die Design Structure Matrizen (DSM) angeordnet, in denen die Relationen von Elementen einer Domäne abgebildet werden. Abseits der Diagonalen befinden sich die Domain Mapping Matrizen (DMM), in den Relationen zwischen unterschiedlichen Elementarten abgebildet werden. Neben den in Bild 5-10 gezeigten Relationsarten können auch „ähnliche“ Abhängigkeiten verwendet werden, worauf hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wurde. Für die nachfolgenden Analyseschritte ist es primär relevant, dass eine Abhängigkeit existiert und nicht die konkrete Ausprägung.

	Funktion	Komponente	Prozessergebnis	Prozessschritt	Person	Meilenstein
Funktion	- hat Schnittstelle mit - hat Einfluss auf - trägt bei	- benötigt - wird realisiert durch	- wird realisiert durch - wird beeinflusst von	- wird realisiert durch - wird beeinflusst von	- wird verantwortet von - wird bearbeitet von	- wird überprüft von - ist erforderlich für - wird benötigt für
Komponente		- hat Schnittstelle mit - hat Einfluss auf	- wird beschrieben von - wird definiert von	- wird erzeugt von - wird beeinflusst von	- wird verantwortet von - wird bearbeitet von	- wird überprüft von - ist erforderlich für - ist betroffen von
Prozessergebnis			- erzeugt - benötigt	- wird erzeugt von - wird bearbeitet von - wird benötigt für	- wird verantwortet von - wird bearbeitet von	- wird benötigt für - ist betroffen von
Prozessschritt				- erfordert - liefert Input an	- wird durchgeführt - wird verantwortet	- wird beeinflusst von
Person					- kommuniziert mit - arbeitet zusammen mit	- ist betroffen von
Meilenstein						- ist Vorgänger - ist Nachfolger

Bild 5-10: Metamodell des integrierten Produkt- und Prozessmodellierung in Matrixdarstellung

Es wird darauf hingewiesen, dass im Metamodell sowie in allen weiteren Modellen die Lese- richtung „Zeile beeinflusst Spalte“ verwendet wird. Das bedeutet im Fall von gerichteten Re- lationen zeigt die Verknüpfung vom Element in der Zeile hin zum Element in der Spalte. Die gerichteten Relationen werden in erster Linie innerhalb von DSMs (Diagonale) verwendet. In den die einzelnen Domänen verknüpfenden DMMs wird in der hier dargestellten Anwendung zumeist nur eine Verknüpfung der Elemente ohne Richtung abgebildet. Daher ist die gesamte MDM bezüglich der Diagonale symmetrisch, wobei die Matrizen auf der Diagonale dies nicht sind. Es muss daher nur eine Hälfte des Modelles erstellt bzw. in die Analysen einbezogen werden. Die DMMs unterhalb der Diagonale repräsentieren jeweils die „passiven Formulie- rung“ der Relationen in den zugehörigen Teilmatrizen oberhalb der Diagonale.

Es können zudem zwei Partialmodelle unterschieden werden. Das Produktmodell bildet die Architektur (Funktionen, Komponenten sowie der Verknüpfung) des technischen Produktes ab. Es befindet sich somit in der linken oberen Ecke der Matrix. Das Prozessmodell umfasst die Domänen Prozessschritte, Personen und Meilensteine. Die Prozessergebnisse nehmen eine Sonderstellung ein und dienen zur Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodell (siehe Kap. 5.5.4).

Die Verwendung von MDM-Modellen bringt auch eine Reihe von Nachteilen, die bei der Ar- beit mit dieser Methode beachtet werden müssen (vgl. [BROWNING 2001, S.301f; KREIMEYER 2010, S.107]):

- Die Modellierung in Form von Matrizen ist Entwicklern in der Regel unbekannt und entspricht nicht den gewohnten Modellen. Die Matrixdarstellung ist somit zwar domänenneutral aber ohne erklärende Hinweise nicht intuitiv verständlich.
- Die Matrizen werden aufgrund der Vielzahl von abgebildeten Domänen sehr schnell sehr groß und damit unübersichtlich. Dies kann durch den Einsatz eines geeigneten Rechnerwerkzeugs zur Unterstützung der Datenakquisition und Systemanalyse vermindert werden (siehe Kap. 5.5.5 und Kap. 5.9).
- Die Modellierung in MDMs ist nicht eindeutig und die Leserichtung muss mit angegeben werden. Es kann die Leserichtung „Zeile beeinflusst Spalte“ oder „Spalte beeinflusst Zeile“ verwendet werden (siehe oben).
- Die Erstellung und vor allem die Interpretation der Matrizen sind schwierig und erfordern einen hohen kognitiven Aufwand. Dies wird bei großen Matrizen noch verstärkt und bestärkt die Notwendigkeit eines Rechnerwerkzeugs.
- Die notwendige Einarbeitung bedeutet einen Aufwand (Zeit und Kapazität), der von Anwendern erbracht werden muss. Dieser ist jedoch überschaubar und ist in der Regel im Bereich von mehreren Stunden angesiedelt (siehe hierzu auch Kap. 6.2.2). Ein grundlegendes Verständnis kann nach Erfahrungen des Autors auch in kurzen Gesprächen vermittelt werden.
- Bei der Modellierung dynamischer Strukturen (Prozesse) geht die zeitliche Komponente verloren. Es fehlt die für Entwickler bekannte Prozessdarstellung in Gantt-Charts oder sonstigen Ablaufplänen. Es ist zwar die Reihenfolge der Prozessschritte ersichtlich, jedoch ist zur Darstellung ihrer zeitlichen Dauer ein weiteres Modell erforderlich. Die Zeit- und insbesondere die Terminplanung müssen somit separat erfolgen. Dies ist ein grundlegender Nachteil sämtlicher Netzwerktechniken. Auch hier kann ein Tool zur Erstellung alternativer grafischer Darstellungen verwendet werden.
- Es besteht ein hoher Aufwand zur Akquisition der erforderlichen Daten sowie deren Übertragung in Matrizenform. Vor allem bei großen Matrizen stellt die Sicherstellung der Korrektheit sowie der Konsistenz des Modells einen nicht zu unterschätzenden Faktor dar (siehe hierzu Kap. 5.5.5).

Im Folgenden werden der Aufbau sowie das Vorgehen zur Erstellung des integrierten Produkt- und Prozessmodells dargestellt. Dabei wird zunächst auf die beiden Teile (Produktmodell und Prozessmodell) des Gesamtmodells getrennt eingegangen und im Anschluss deren Verknüpfung dargestellt.

### 5.5.2 Erstellung des Produktmodells

Der erste Schritt bei der Modellierung des Systems bildet die Beschreibung und Abbildung der Elemente und Relationen des technischen Produktes. Das diese Domänen umfassende Partialmodell wird im Folgenden als **Produktmodell**<sup>50</sup> bezeichnet und spiegelt die Produktar-

---

<sup>50</sup> Produktmodelle sind formale Abbilder realer oder geplanter Produkteigenschaften [Grabowski et al. 1993].

chitektur (vgl. Kap. 3.2.2) wieder. Die Abbildung der Produktarchitektur ermöglicht im Prozessverlauf der Entwicklung die parallele und zeitliche Erstellung bzw. Konkretisierung von Funktions- und Wirkstruktur [SUH 1998; BRAUN et al. 2007a].

Die Entwicklung und Modellierung der Funktions- sowie der Wirkstruktur erfolgt im Rahmen der Konzeptentwicklung. Da mit dem vorliegenden Ansatz in erster Linie Serienentwicklungsprozesse in der Phase des domänenspezifischen Entwurfs sowie der Systemintegration unterstützt werden sollen (siehe Kap. 5.1), ist die Architektur zum Abschluss der Konzeptphase im Wesentlichen bekannt. Zur Erstellung und Modellierung kann dabei auf bekannte Vorgehensweisen und Methoden zurückgegriffen werden. Für den hier betrachteten Anwendungsfall bieten sich die entsprechenden Partialmodelle der Spezifikationstechnik für mechatronische Produkte an [GAUSEMEIER et al. 2009a], die auf den Arbeiten von [GEHRKE 2005] sowie [FRANK 2006] basieren. Aus der darin enthaltenen *Funktionshierarchie* sowie dem *Wirkstrukturmodell* können die entsprechenden Informationen zur Erstellung des Produktmodells abgeleitet werden. Es existiert ebenfalls eine Rechnerunterstützung, so dass die notwendigen Informationen mit entsprechenden Schnittstellen auch teilautomatisiert in eine geeignete Matrixform [ANACKER et al. 2011] übersetzt werden könnten (siehe hierzu auch Kap. 5.5.5).

Die Produktarchitektur umfasst drei unterschiedliche Aspekte des technischen Systems, die entsprechend erfasst werden müssen. Dies sind die *Funktionshierarchie* (horizontale Vernetzung), *Baustruktur* (horizontale Vernetzung der Komponenten) sowie die *Verknüpfung von Funktionen und Komponenten* (Komponente realisiert Funktion). Zusätzlich werden im hier entwickelten Produktmodell die *Funktionsstruktur* (vertikale Vernetzung der Funktionen) sowie die *Wirkstruktur* (vertikale Vernetzung der Komponenten) betrachtet. Im Folgenden werden die einzelnen Strukturen des Produktmodells detailliert dargestellt.

Aufgrund der zentralen Stellung der Funktionen in mechatronischen Produkten (Funktionsorientierung, siehe Kap. 2.2) wird zunächst die Funktionsvernetzung betrachtet. Dabei kann wie beschrieben eine hierarchische sowie eine vertikale Perspektive eingenommen werden.

Der **hierarchischen Betrachtung** von Funktionen liegt das dargestellte Verständnis der funktionsorientierten Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse (siehe Kap 5.3) zugrunde. Demnach erfordert die Realisierung von mechatronischen Funktionen das Zusammenwirken unterschiedlicher Teilfunktionen aus den Disziplinen. Diese können wiederum aus mehreren disziplinspezifischen oder disziplinübergreifenden Teilfunktionen bestehen. Zur Unterstützung der Modellerstellung ist eine Charakterisierung der einzelnen Ebenen erforderlich. Damit wird ebenfalls gewährleistet, dass vergleichbare Modellierungsergebnisse erzeugt werden und diese für die Prozessplanung und -synchronisation verwendet werden können.

Auf oberster Ebene (höchster Abstraktionsgrad) befinden sich wie bereits dargestellt *mechatronische Funktionen* (siehe Bild 5-11). Diese bilden die Gesamtfunktionen des technischen Produktes ab und sind in der Regel vom Kunden bzw. Nutzer wahrnehmbar und gewollt. Innerhalb der mechatronischen Funktionen kann zur detaillierten Betrachtung zwischen Kundenfunktionen sowie Systemfunktionen unterschieden werden. Die Kundenfunktionen nehmen dabei primär die (nichttechnische) Perspektive des Kunden ein („Lichteinfall ermöglichen“), während die Systemfunktionen das Verhalten des Systems aus der technischen Perspektive („Deckel automatisch öffnen“) beschreiben. Diese Unterscheidung kann getroffen



werden, es ist jedoch nicht zwingend erforderlich da beide die Gesamtfunktionalität des Produktes beschreiben. Ebenso kann diese Unterscheidung auch eingesetzt werden, falls mehrere mechatronische Systeme zu einem Systemverbund zusammengeschlossen werden (vgl. Kap. 3.1.2).

Zur Realisierung der mechatronischen Funktionen sind unterschiedliche *Teilfunktionen* erforderlich. So benötigt im Beispiel der Go-Kart Bremse die Gesamtfunktion „Fahrzeug kontrolliert abbremsen“ das Zusammenspiel der Teilfunktionen „Fahrndynamik regeln“, „Bremsmoment erzeugen“ sowie „Fahrerwunsch erkennen“ (Bild 5-11 rechts). Diese können wiederum in weitere Teilfunktionen aufgespalten werden, wobei in Abhängigkeit vom konkreten Anwendungsfall beliebig viele Teilfunktionsebenen verwendet werden können.

Auf unterster Ebene (niedrigster Abstraktionsgrad) befinden sich *technische Funktionen*. Diese sind dadurch charakterisiert, dass sie in der Regel in eine Disziplin eingeordnet werden können sowie eine Zuordnung zu den sie realisierenden Komponenten des Systems erfolgen kann. Dabei kann eine Funktion sowohl von mehreren Komponenten realisiert werden, als auch eine Komponente zu mehreren Funktionen beitragen (m:n Verknüpfungen). Es ist ein Detaillierungsgrad anzustreben, in dem eindeutige (1:1) Verknüpfungen möglich sind.

In bestimmten Anwendungsfällen kann die vollständige Beschreibung des Systems aus funktionaler Sicht die Verwendung von *Querschnittsfunktionen* erfordern. Dabei handelt es sich um grundlegende Funktionen des technischen Produktes, die in unterschiedlichen mechatronischen Teilsystemen genutzt werden jedoch keinen direkten Bezug zu den betrachteten Entwicklungsumfängen aufweisen. Dabei handelt es sich um grundlegende Funktionen wie beispielsweise die Bereitstellung von Energie oder die Verarbeitung spezifischer Sensorinformationen (z. B. Geschwindigkeit, Temperatur), die zwar als Eingangsgrößen benötigt, jedoch nicht explizit entwickelt werden. Die Notwendigkeit von Querschnittsfunktionen ist somit abhängig von der Wahl der Systemgrenze.

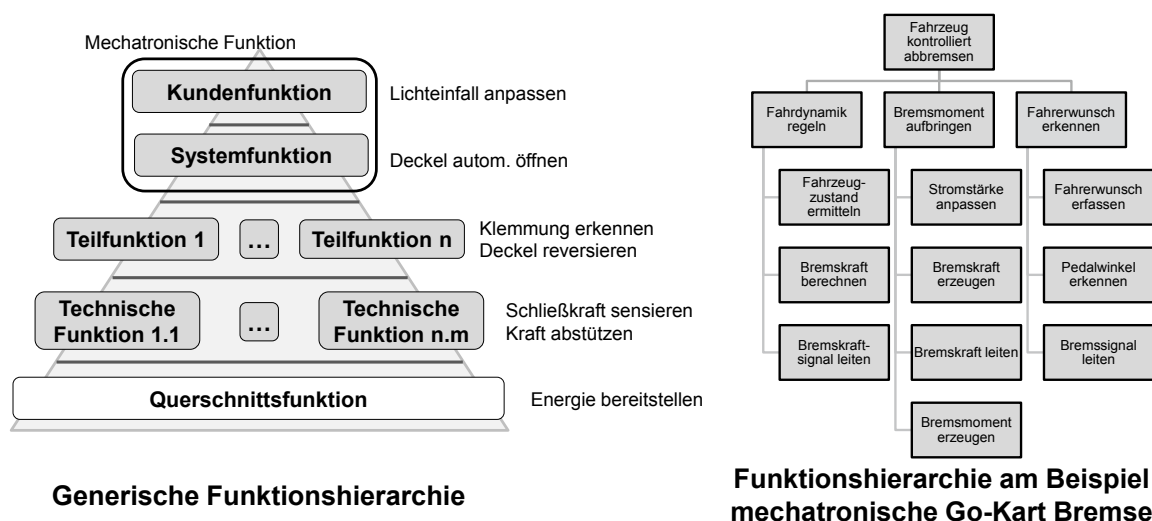


Bild 5-11: Hierarchische Betrachtung von Funktionen mechatronischer Produkte

Weiterhin kann die **Funktionsstruktur** (vertikale Vernetzung der Funktionen) betrachtet werden. Die Relationen zwischen den Funktionen können dabei aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Eine Möglichkeit besteht in der Abbildung der Vernetzung aufgrund der Flussbeziehungen<sup>51</sup> in Art eines umsatzorientierten Funktionsmodells (siehe Bild 5-3). In dieser Betrachtung stehen die Wirkzusammenhänge aufgrund der Eingangs- und Ausgangsinformationen im Mittelpunkt, wodurch funktionale Wirkketten aufgespannt und analysiert werden können. Alternativ können funktionale Vernetzungen aufgrund gemeinsam genutzter Komponenten betrachtet werden. Dieser Fall ist für die Mechatronik von besonderem Interesse, da die Realisierung „höherer“ Funktionen in der Regel das Zusammenwirken unterschiedlicher Komponenten aus unterschiedlichen Disziplinen erfordert. Auf die unterschiedlichen Funktionsstrukturen sowie deren Bedeutung für die Planung und Synchronisation des Entwicklungsprozesses wird in Kap. 5.6 näher eingegangen.

Die Erstellung eines umsatzorientierten Prozessmodells mit den entsprechenden Flussbeziehungen sowie dessen Übertragung in Matrixform ist im hier vorliegenden Anwendungsfall in der Regel nicht erforderlich, da die entsprechenden Flussbeziehungen in der Wirkstruktur abgebildet werden. Falls die Informationen jedoch zur Verfügung stehen, kann ein solches Modell im Rahmen der Plausibilitätskontrolle des geplanten Entwicklungsprozesses sowie zur Erstellung von Versuchsplänen verwendet werden (siehe Kap. 5.6).

Die **Wirkstruktur** beschreibt die zur Realisierung der Funktionen erforderlichen Wirkprinzipien und deren Kombination bzw. Komponenten des technischen Systems (vertikale Vernetzung). Hierbei treten ebenfalls unterschiedliche Verknüpfungen bzw. Abhängigkeiten zwischen den Komponenten auf, die aus geometrischen Abhängigkeiten oder aus den Flussbeziehungen resultieren. Bei der Erstellung der Wirkstruktur ist darauf zu achten, dass soweit wie möglich die primäreren bzw. die dominanten Relationen sowie deren Wirkrichtung in den einzelnen Disziplinen modelliert werden. In der Mechanik liegen aufgrund der physischen Schnittstellen zumeist wechselseitige Abhängigkeiten vor, so dass hier zumeist keine Unterscheidung getroffen werden muss. In der Elektrik/Elektronik ist hingegen die Richtung des Energie- bzw. Informationsflusses die relevante Information. Hier existiert zumeist ebenfalls eine geometrische Abhängigkeit, die jedoch nur sekundär wichtig ist und daher nicht abgebildet werden muss. Analog verhält es sich in der Softwaretechnik. Es wird angestrebt, dass im erstellten Wirkmodell die Richtung der dominanten Abhängigkeiten abgebildet wird, da diese Informationen für die spätere Prozessplanung benötigt werden. Bei der Modellierung der Wirkstruktur sollte daher primär die Richtung der Beeinflussung abgebildet werden.

Diese unterschiedlichen Abhängigkeiten zwischen den Komponenten können separat sowie in einer aggregierten Matrix betrachtet werden. Alternativ kann zur Unterscheidung der Flussarten eine quantifizierte Matrix verwendet werden, in der jeder Art von Abhängigkeit ein bestimmter Zahlenwert zugeordnet wird. Im hier betrachteten Fall wird die Abbildung der Wirkstruktur in ein Modell angestrebt, da möglichst alle Abhängigkeiten zwischen den Komponenten berücksichtigt werden sollen. Dabei ist primär nicht die Art der Abhängigkeit, sondern deren Wirkrichtung entscheidend. Aus diesem Grund wird die Erstellung einer um-

---

<sup>51</sup> Stoff-, Energie- und Signalfluss [Pahl et al. 2007, S.39FF]

satzorientierten Funktionsstruktur nicht benötigt, da die Abhängigkeiten sowie deren Wirkrichtung in der Wirkstruktur modelliert werden.

Der letzte Aspekt der Produktarchitektur sind die hierarchischen Abhängigkeiten der Komponenten, die in der **Baustruktur** beschrieben werden. In dieser Perspektive wird, analog zur Funktionshierarchie, die physische Zusammensetzung des technischen Systems, ausgehend von Bauteilen über Baugruppen und Module zum Gesamtsystem dargestellt.

Zur Erstellung des mechatronische Produktmodells werden somit die Domänen Funktionen und Komponenten, sowie deren inter- und intradomänen Abhängigkeiten benötigt. Das mechatronische System wird hierbei mit Hilfe von mehreren (Teil-)Matrizen beschrieben, in denen jeweils spezifische Teilaspekte der Produktarchitektur modelliert werden (siehe Bild 5-12). Der verwendete MDM-basierte Ansatz erlaubt es, die zwei unterschiedlichen – bisher nur unzureichend integrierten – Sichtweisen auf das System in einem Modell zu vereinen.

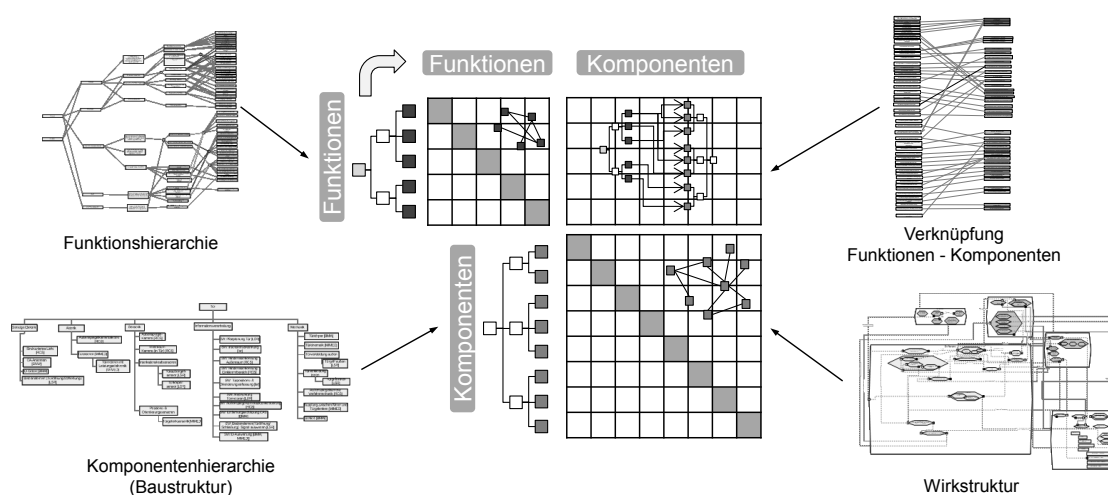


Bild 5-12: MDM-basiertes mechatronisches Produktmodell [nach HELLENBRAND et al. 2010]

Das MDM-basierte Produktmodell ermöglicht somit die **durchgängige und transparente Verknüpfung der erstellten Teilmodelle**. Die diversen Relationen innerhalb der beiden betrachteten Domänen sind modelliert und können beispielsweise durch stärkebasierte Graphen grafisch dargestellt werden (siehe Kap. 3.3.2). Weiterhin sind auch die Verknüpfungen zwischen den Domänen abgebildet, so dass diese Repräsentation einen einfachen Wechsel zwischen funktions- und bauteilorientierter Sichtweise erlaubt. Die **Partitionierung** des Produktes kann über eine unterschiedliche Einfärbung der Elemente im Graphen bzw. der Zeilen und Spalten in der MDM abgebildet werden. Dies ermöglicht die einfache Identifikation von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten und Schnittstellen.

Die Modellierung der Produktarchitektur mechatronischer Produkte unterstützt bereits ein tieferes Systemverständnis und ermöglicht eine bessere Kommunikation zwischen den Disziplinen (Details siehe Kap. 5.7). Neben der Integration der beiden unterschiedlichen Perspektiven werden mit diesem Modell weiterhin sämtliche Vorteile der MDM Darstellung und der zugrundeliegenden Methodik nutzbar gemacht. So können in Abhängigkeit der benötigten In-

formationen bzw. der Fragestellung auch andere Sichten in den einzelnen Teilmatrizen berechnet werden (vgl. Kap. 3.3.3). So muss die Funktionsstruktur nicht notwendigerweise die Input-/Output-Beziehungen der Funktionen ähnlich eines umsatzorientierten Funktionsmodells abbilden. Alternativ können auch zeitliche Zusammenhängen von Funktionen oder die Abhängigkeiten aufgrund gemeinsam genutzter Komponenten berechnet werden.

Die Abbildung von Funktionshierarchie sowie Baustruktur ist theoretisch in MDMs möglich, wobei hierbei erhebliche Einschränkungen beachtet werden müssen und eine konsistente Beschreibung bisher nicht existiert (siehe [KREIMEYER 2010, S.54]). Aus diesem Grund werden im hier verwendeten Modell keine hierarchischen Beziehungen abgebildet. Es werden stattdessen die Funktionen und Komponenten auf dem höchsten Detaillierungsgrad in der MDM modelliert. Aus diesem Grund werden die Funktionen sowie Komponenten lediglich auf unterster Ebene (technische Funktionen) in der MDM modelliert.

Zur Erstellung des Produktmodells werden somit Funktionshierarchie, Baustruktur, Wirkstruktur, Funktionsstruktur sowie die Verknüpfung von Komponenten und technischen Funktionen des mechatronischen Systems benötigt. Die letzten drei genannten müssen in die entsprechende Matrixdarstellung übertragen werden. Eine detaillierte Betrachtung zu erforderlichen Eingangsinformationen wird in Kap. 5.5.5 vorgenommen.

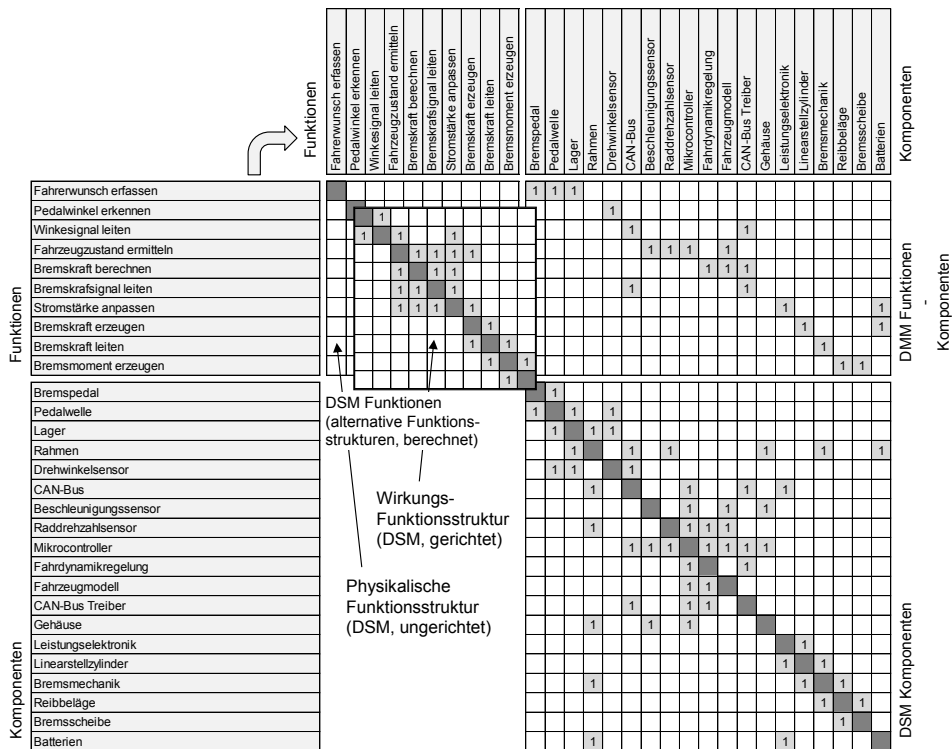


Bild 5-13: Produktmodell bestehend aus Funktions- und Komponentenstruktur sowie deren Verknüpfung

In Bild 5-13 ist das erstellte Produktmodell des mechatronischen Go-Kart Bremssystems dargestellt. In diesem Fall wird eine binäre Matrix verwendet; es wird innerhalb der Wirkstruktur nicht nach den unterschiedlichen Relationsarten unterschieden. Die Funktionsvernetzung

wurde nicht explizit aus nativen Daten modelliert, sondern auf zwei unterschiedliche Arten abgeleitet. So wurde zum einen eine ungerichtete physikalische Funktionsstruktur<sup>52</sup> aus der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten berechnet (Anhang 9.2: Fall 1 bzw. 2), zum anderen die gerichtete Wirkungs-Funktionsstruktur, in die sowohl die Wirkstruktur wie auch die Vernetzung mit den Funktionen einfließt (Anhang 9.2: Fall 4 bzw. 5). Diese Strukturen bilden somit nicht das umsatzorientierte Funktionsmodell (siehe Bild 5-3) ab. Auf die Berechnung sowie Interpretation der Teilmatrizen wird in Kap. 5.6 näher eingegangen.

### 5.5.3 Erstellung des Prozessmodells

Das zweite Partialmodell bildet die Strukturen des mechatronischen Entwicklungsprozesses ab und wird daher konsequenterweise als **Prozessmodell** bezeichnet. Den Kern des Modells bilden die Domänen Prozessschritte, Personen sowie Meilensteine. Hinzu kommen die Prozessergebnisse, die sowohl der Prozess- wie der Produktdomäne zugeordnet werden können (siehe Kap. 5.5.4). Die hierzu erforderlichen strukturellen Prozessinformationen können im Rahmen der Prozessplanung (Kap. 5.6) neu erstellt bzw. mit geringen Verlusten aus jeder Art von Prozessmodell extrahiert werden (vgl. [KREIMEYER 2010, S. 72FF]).

In der Domäne der **Prozessschritte** wird die vertikale Prozessstruktur, d.h. die Verknüpfung der Prozessschritte untereinander, abgebildet. Diese Domäne stellt somit die Ablauforganisation eines Entwicklungsprojektes dar. Diese Modellierung gibt die Reihenfolge und somit kausale Zusammenhänge zwischen den einzelnen Entwicklungsschritten wieder. Als Ursache der Kausalzusammenhänge der Prozessschritte können die Prozessergebnisse herangezogen werden. Diese stellen die Schnittstellen zwischen den einzelnen Prozessschritten dar, da in ihnen die ausgetauschten bzw. erforderlichen Eingangs- und Ausgangsinformationen enthalten sind. Eine Modellierung der Zeitdauern ist beispielsweise mit Verwendung einer quantitativen Matrix möglich, in der die Dauern der Prozessschritte auf der Diagonale hinterlegt werden. Somit sind eine automatisierte Ableitung von grafischen Ablaufplänen sowie eine Terminplanung möglich.

Die dritte betrachtete Domäne des Prozessmodells sind **Personen**. Diese können unterschiedliche Rollen einnehmen und somit auf verschiedene Arten verknüpft werden. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen operativen **Bearbeitern** (z. B. Entwickler) sowie **Verantwortlichen** (z. B. Führungskräfte) möglich. Die Verantwortlichen können dabei je nach Organisationsform eine Funktions- oder eine Bauteilverantwortung innehaben. Die Bearbeiter können direkt mit den von ihnen ausgeführten Prozessschritten verknüpft werden. Analog ist bei den Verantwortlichen eine direkte Anbindung an die Funktions- bzw. die Komponentenstruktur möglich. Prinzipiell ist es auch möglich, dass eine Person mehrere Rollen in sich vereint, in diesem Fall können auch mehrere Relationen mit der entsprechenden Person verknüpft werden. In der Domäne Personen müssen nicht zwangsläufig einzelne Individuen abgebildet werden. Bei abstrakteren Betrachtungen können auch Entwicklungsabteilungen oder externe Dienstleister bzw. Zulieferer modelliert werden.

---

<sup>52</sup> Der Begriff „physikalische Komponentenstruktur“ wird analog zu in Kap. 3.3.3 eingeführten Definition verwendet um die Funktionsvernetzung aufgrund von physischen Komponenten zu beschreiben. Im hier betrachteten Fall werden auch Softwarekomponenten, d. h. nichtphysische Elemente, mitbetrachtet.

Es werden im vorliegenden Anwendungsfall zwischen den Personen lediglich inhaltliche Abhängigkeiten betrachtet. Hierarchische Beziehungen (Vorgesetzter, Untergebene) werden nicht modelliert, d. h. die Aufbauorganisation wird nicht explizit abgebildet. Die Ergebnisse der Analyse können jedoch zur Optimierung der Aufbauorganisation (z. B. Abteilungsstruktur und -zusammensetzung) herangezogen werden (siehe Kap. 5.7.2).

Zur Vervollständigung der Prozessdomäne werden an dieser Stelle auch die **Prozessergebnisse** betrachtet. Diese stellen sämtliche Modelle bzw. Informationen über das zu entwickelnde technische Produkt dar. Sie bilden somit die Ursachen für die Input-/Output-Beziehungen zwischen den einzelnen Prozessschritten und können somit als Eingangs- sowie Ausgangsgrößen mit den Prozessschritten verknüpft werden. Im vorliegenden Anwendungsfall wird die Verknüpfung immer über die Ausgangsgrößen hergestellt, d. h. ein Prozessschritt erzeugt ein Prozessergebnis.

In Bild 5-14 ist die abstrakte Form des Prozessmodells mit den enthaltenen Domänen und Teilmatrizen dargestellt.

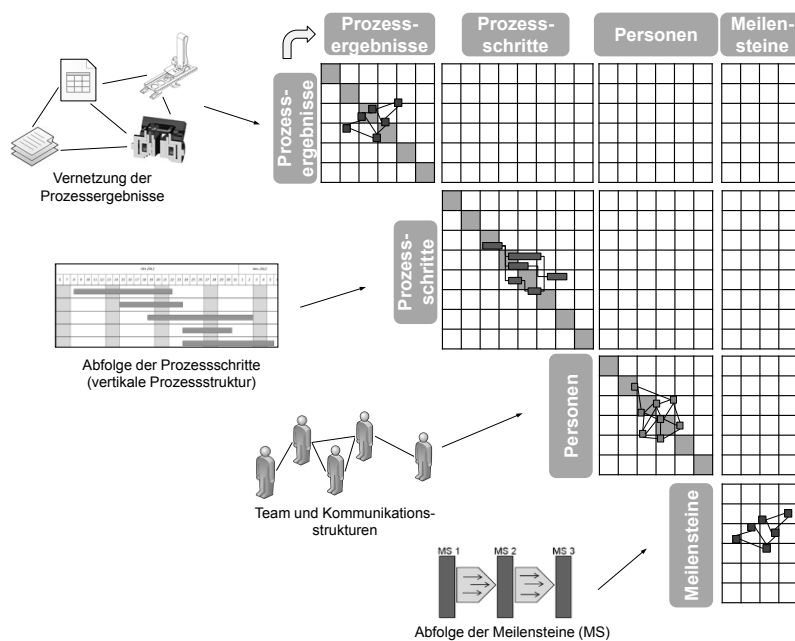


Bild 5-14: Generische Darstellung des MDM-basierten Prozessmodells

Eine zentrale Herausforderung bei der strukturellen Modellierung von Entwicklungsprozessen liegt in der Abbildung bzw. dem Umgang mit **Zyklen und Iterationen**. Diese sind auf zwei Ursachen zurückzuführen: Zum einen auf die Unsicherheiten in der Zielsetzung, die eine exakte Vorausplanung des Prozesses verhindert, zum anderen auf den zunehmenden Erkenntnisgewinn sowie die zunehmende Konkretisierung durch die getroffenen Entscheidungen (siehe Kap. 3.4.1). Aus diesem Grund wurden die Zyklen und Iterationen auf der operativen Ebene **in die Prozessschritte integriert** und nicht explizit abgebildet. Dies bedeutet, der Prozess wird auf einer Abstraktionsebene „oberhalb“ dieser (nicht zu vermeidenden) Iterationen

modelliert. Somit müssen auch keine Entscheidungspunkte oder alternative Prozesspfade abgebildet werden, was die Modellbildung deutlich vereinfacht.

Ein weiterer Grund für den hier gewählten Abstraktionslevel betrifft die unterschiedlichen Vorgehensweisen der Disziplinen in der Entwicklung (siehe Kap. 3.1.5). Auf diese Art und Weise kann in der Planung ein übergreifender Prozess auf Basis von Entwicklungsschritten modelliert werden. Dadurch wird auch das Vorgehen in den einzelnen Disziplinen berücksichtigt. Die detaillierten Vorgehensweisen sowie spezifischen Iterationen in der Entwicklung können auf Ebene der operativen Entwickler abgebildet werden. Die Zielsetzung liegt darin, die Synchronisation der unterschiedlichen Disziplinen zu fördern. Dies kann auf einem Abstraktionslevel „oberhalb“ der allen Entwicklungsprozessen inhärenten Iterationen erreicht werden. Die Entwickler in den einzelnen Ebenen können durch gemeinsame Zielsetzungen (Funktionserfüllung, Meilensteine) ihre eigenen Prozesse auf diese hin ausrichten.

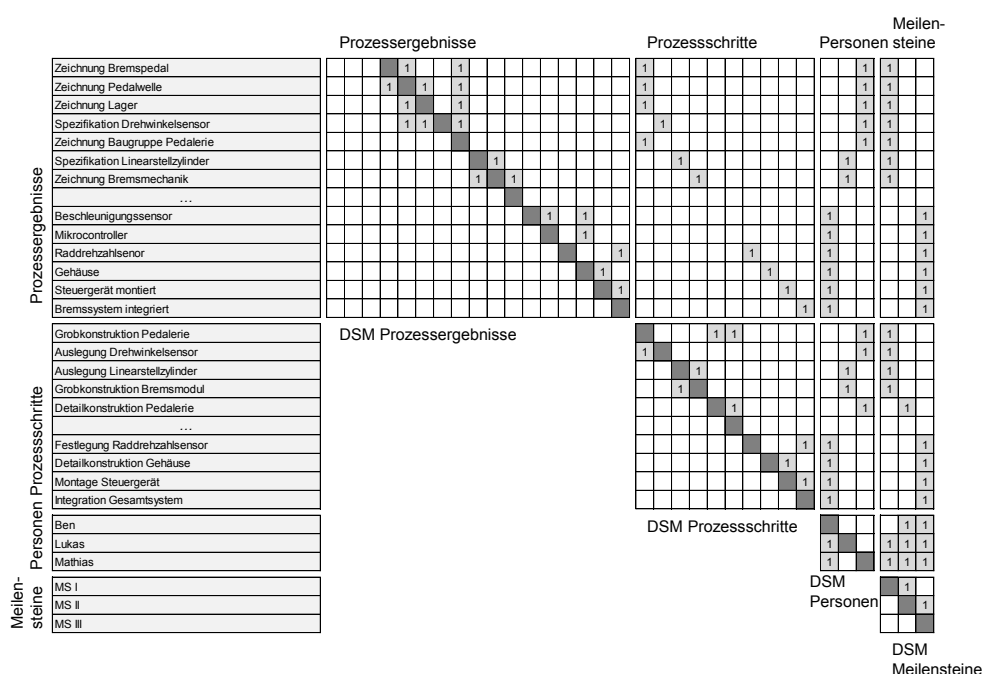


Bild 5-15: Prozessmodell des mechatronischen Bremssystems (Auszug)

### 5.5.4 Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodell

Die zur Verknüpfung der Partialmodelle verwendeten Informationen sind im Prozessmodell bereits grundsätzlich vorhanden. Zur Verknüpfung werden die von den Prozessschritten erzeugten Prozessergebnisse verwendet. Diese liegen in Form von virtuellen oder realen Produktmodellen bzw. Dokumenten<sup>53</sup> vor und beschreiben die Ausprägungen der Komponenten zu einem spezifischen Zeitpunkt. Nach [BAUMBERGER 2007, S.126F] kann die in den Doku-

<sup>53</sup> In der Literatur findet sich auch der Begriff Artefakt bzw. Produktartefakt. Darunter werden sämtliche im Prozess erzeugten (Produkt-)Modelle verstanden, die spezifische Ausprägungen des Produktes beschreiben.

menten enthaltene Information wie ein Werkstück im Materialfluss angesehen und behandelt werden. Dabei ist sie in Bezug auf das technische Produkt durch eine zunehmende Konkretisierung gekennzeichnet. Da Dokumente sowohl der Produkt- wie der Prozessstruktur zugeordnet werden können [COLLIN 2001, S.86ff], stellen sie eine geeignete Basis für die Verknüpfung der beiden Partialmodelle dar.

Die **Prozessergebnisse** können somit zur Verknüpfung der beiden Partialmodelle verwendet werden. Die Prozessergebnisse können dabei auf Seiten des Produktes den entsprechenden Komponenten zugeordnet werden. Auf der anderen Seite stellen die Prozessschritte die Anknüpfungspunkte an das Prozessmodell dar, da Prozessschritte eindeutig ein bestimmtes Prozessergebnis erstellen bzw. zu diesem beitragen. Es ist damit auch hier eine Verknüpfung zwischen Prozessergebnissen und Prozessschritten möglich.

Somit liegt das **integrierte Produkt- und Prozessmodell** vor, in dem die betrachteten Elemente sowie deren Relationen abgebildet werden (Bild 5-16). Das Produktmodell befindet sich im oberen linken Teil der Matrix, das Prozessmodell bildet den unteren rechten Teil des Modells. Dazwischen sind die Verknüpfungen zwischen beiden Partialmodelle über die unterschiedlichen Teilmatrizen abgebildet.

Auf die beispielhafte Darstellung des vollständigen integrierten Systemmodells für das Beispiel Go-Kart wird an dieser Stelle verzichtet, da die Darstellung zu unübersichtlich ist. Für Details wird das im Anhang 9.6 der Arbeit dargestellte Vorgehensmodell verwiesen, das ebenfalls dieses Beispiel verwendet.

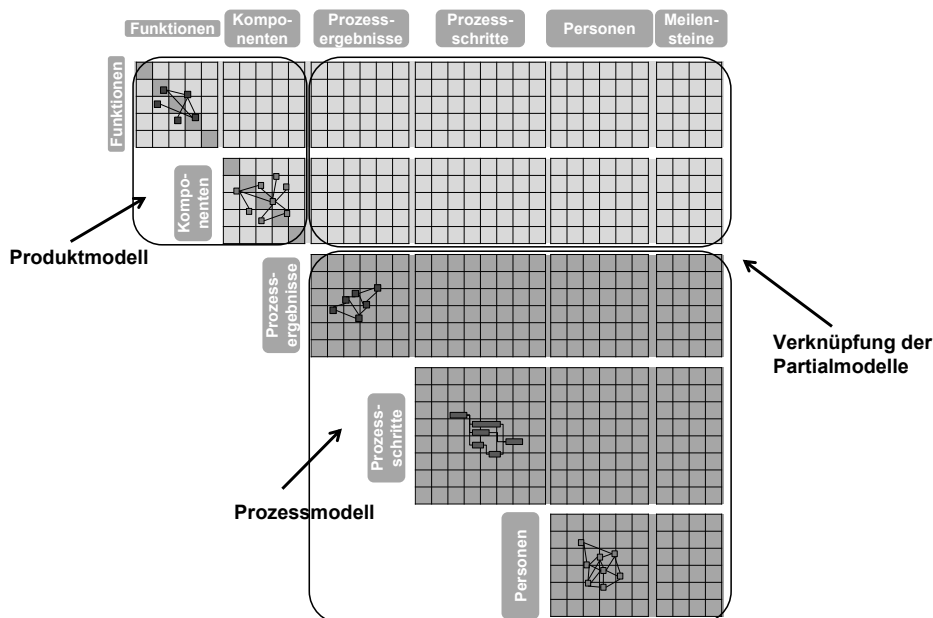


Bild 5-16: Generische Darstellung des integrierten Produkt- und Prozessmodells

Zum Abschluss der Beschreibung des integrierten Produkt- und Prozessmodells wird eine **Abgrenzung zur vorhandenen Arbeiten**, insbesondere zur Arbeit von DIEHL, vorgenommen. DIEHL beschäftigt sich ebenfalls mit einer matrixbasierten Modellierung mecha-



tronischer Produktstrukturen [DIEHL 2009]. Das verwendete Produktmodell ist dabei dem hier verwendeten sehr ähnlich und befasst sich mit der methodisch gestützten Erarbeitung und Visualisierung zentraler interdisziplinärer Abhängigkeiten. DIEHL beschränkt sich dabei auf die Betrachtung von Funktionen und Systemelementen (Produktsicht) und zeigt erste Ansätze zur Verknüpfung mit Verantwortlichkeiten (Prozesssicht). Zielsetzung ist die Erhöhung des interdisziplinären Systemverständnisses und die Förderung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit. DIEHL stellt außerdem ein Vorgehensmodell zur Prozessanalyse, ein grundlegendes matrixbasiertes Produktmodell mit Erweiterungen um Verantwortlichkeiten sowie eine dreidimensionale Visualisierung von MDMs zu Verfügung. Eine vollständige Modellierung des Gesamtsystems von Produkt und Prozess fehlt jedoch. Der Fokus seiner Arbeit liegt auf der Identifikation von Problemen der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit sowie der Visualisierung von strukturellen Abhängigkeiten.

Im folgenden Kapitel wird zunächst auf die der Modellerstellung vorausgehende Datenakquisition sowie die damit verbundenen Schwierigkeiten eingegangen. Außerdem erfolgt eine Darstellung der Interpretation der einzelnen Teilmatrizen.

### 5.5.5 Datenakquisition, Modellerstellung und Modellinterpretation

Ein zentraler Punkt bei der Erstellung des integrierten Produkt- und Prozessmodells ist die Akquisition der benötigten Daten sowie die Sicherstellung der Integrität der in den Matrizen abgebildeten Daten. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden, die sich in ihren Ursachen klar voneinander abgrenzen, jedoch zu ähnlichen Auswirkungen führen: Die *Übertragung von vorhandenen Daten* in die Matrizenform sowie die *Beschaffbarkeit der notwendigen Daten*.

Der erste Fall betrifft die Validität und Korrektheit der **Übertragung der vorhandenen Daten in die Matrizenform**. Gerade bei großen Matrizen können hierbei Fehler auftreten, indem die Ersteller einzelne Abhängigkeiten übersehen oder vergessen. Dies ist gerade bei großen Modellen der Fall. Zudem ist die Redundanzfreiheit sicherzustellen, so dass (z. B. durch unterschiedliche Ausfüller) direkte und indirekte Abhängigkeiten abgebildet werden und so das Modell verfälschen. Weiterhin ist auch die Kontrolle kognitiv sehr anspruchsvoll, so dass entsprechend viel Zeit und Iterationen eingeplant werden müssen, die meist nicht zur Verfügung stehen. Eine Möglichkeit zur Abhilfe ist der Einsatz von entsprechenden Rechnerwerkzeugen, die Plausibilitätskontrollen ermöglichen sowie die Anbindung an bestehende PDM/PLM-Systeme aus denen die Informationen teilautomatisiert abgeleitet werden können. So existieren Rechnerwerkzeuge zur Unterstützung der Erstellung von Produktkonzept bzw. Produktarchitektur [ANACKER et al. 2011] sowie von Prozessmodellen auf Basis bekannter Modelle. Aus diesen Modellen können die benötigten strukturellen Informationen sehr gut abgeleitet werden (siehe z. B. [KREIMEYER 2010, S.72ff]).

Der zweite Punkt ist die **Beschaffbarkeit der Daten** an sich. Häufig sind die Informationen vorhanden, jedoch besitzen die Entwickler keine Möglichkeiten die notwendigen Daten zu beschaffen. Es werden unterschiedliche Daten für die Planung von Entwicklungsprozessen benötigt. Eine Übersicht von bei der Entwicklungsprozessplanung notwendigen bzw. verwendeten Eingangsgrößen findet sich bei [BAUMBERGER 2007; CHUCHOLOWSKI 2011]. Dies kann in der Art und Weise begründet werden, dass die Informationen in unterschiedlichen Systeme-

men vorhanden sind. Oder die Daten sind in einer nicht übertragbaren Form vorhanden. Im Folgenden wird dieser Punkt im Kontext der hier durchgeführten Betrachtungen weiter ausgeführt. Dabei werden die Erfahrungen des Autors wiedergegeben, die im Verlauf mehrerer Projekte zur Erstellung des Modells gewonnen wurden.

Innerhalb des *Produktmodells* wurde festgestellt, dass die Vernetzungen in der Komponentendomäne sehr gut beschaffbar sind und entsprechend mit wenig Aufwand modelliert werden können. Dies trifft sowohl auf die Baustruktur sowie die Abhängigkeiten innerhalb der Wirkstruktur zu. Diese lassen sich auf Basis von bestehenden Modellen aus vorhandenen PDM/PLM-Systemen ableiten. In Bezug auf die Wirkstruktur sind die Zusammenhänge den Entwicklern, zumindest innerhalb ihrer eigenen Disziplin, bekannt, da sie diese Informationen für ihre Entwicklungsarbeit benötigen. Bei der Betrachtung der Abhängigkeiten innerhalb der Funktionsdomäne hat sich gezeigt, dass die benötigten Informationen deutlich schwieriger bis unmöglich aufzunehmen sind. Die Funktionshierarchie ist im Normalfall vorhanden, da sie im Verlauf der Konzeptentwicklung aus den (Kunden-)Anforderungen abgeleitet wird. Die Vernetzung der Funktionen ist, vor allem disziplinübergreifend, kaum bekannt bzw. zu ermitteln. Es ist mit hohem Aufwand ein Modell der Input-/Output-Beziehungen (umsatzorientiertes Funktionsmodell) möglich, jedoch ist dies im Detail meist auf die eigene Domäne beschränkt. Die direkte Erstellung einer nativen Funktionsstruktur (Vernetzung auf gleichem Abstraktionsgrad) auf Ebene der technischen Funktionen ist somit meist nicht möglich. Einfacher hingegen sind die Identifikation der technischen Funktionen sowie die Vernetzung mit den sie realisierenden Bauteilen. Somit besteht die Möglichkeit die Vernetzung auf Basis der vorliegenden Informationen zu berechnen.

Auf Ebene des *Prozessmodells* stellt sich eine andere Situation dar. Hier ist es deutlich einfacher sowohl die notwendigen Prozessschritte sowie deren direkte Abhängigkeiten zu ermitteln. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Iterationen in die Prozessschritte integriert wurden und sich somit auf der betrachteten Ebene ein quasi-statisches Verhalten ergibt. Ebenso müssen aufgrund des gewählten Abstraktionsgrades keine Entscheidungen und Verzweigungen abgebildet werden, wodurch sich ein lineares Verhalten ergibt. Es existieren zwar wechselseitige Abhängigkeiten und Iterationen, die jedoch auf der operativen Ebene behandelt werden. In bekannten Ansätzen und Prozessmodellen (siehe Kap. 3.5) wird der Ablauf der Entwicklung detailliert dargestellt. Dadurch ist der Aufwand zur Planung des Prozesses deutlich höher, da sämtliche Zwischenschritte abgebildet werden müssen, die nicht planbar sind. Aus diesem Grund werden beispielsweise Ansätze zur situationsspezifischen Anpassung verwendet [ROELOFSEN 2011]. Außerdem sind auch die Prozessergebnisse aus Verbindung der Prozessschritte sowie die Zuordnung von Prozessergebnissen zu Meilensteinen qualitativ sehr leicht zu ermitteln. Das Problem liegt in diesem Fall in der Ausprägung der Prozessergebnisse, die häufig nicht zum Entwicklungsstand der andern Ergebnisse passt (vgl. Kap. 2.2). Direkte Informationen bezüglich notwendiger oder durchgeführter Team- und Kommunikationsstrukturen sind jedoch nicht vorhanden. Es existieren häufig regelmäßige Besprechungen zum Austausch, jedoch sind diese zumeist auf eine bestimmte Gruppe fixiert und nicht der aktuellen Phase sowie dem Inhalt angepasst. Es nehme somit häufig Personen teil, die nicht direkt von diesem Austausch profitieren. Daneben gibt es Abstimmungstreffen auf der operativen Entwicklerebene, jedoch werden diese Informationen nicht systematisch erfasst und können somit auch nicht expliziert werden. Ebenso liegen keine Informationen vor, welche Mitarbei-

ter von welchen Meilensteine betroffen sind oder welche Mitarbeiter über Änderungen an Komponenten bzw. Funktionen informiert werden müssen.

In Bild 5-17 sind die nativen (dunkel) sowie die berechneten (hell) Teilmatrizen im integrierten Produkt- und Prozessmodell dargestellt. Diese Darstellung kann als Grundlage und Orientierung für die Planung der Datenakquisition verwendet werden. Auf Basis der nativen Matrizen (dunkel) können sämtliche abgeleitete Teilmatrizen (hell) berechnet werden. Diese werden daher in den folgenden Schritten als primäre Eingangsinformationen verwendet.

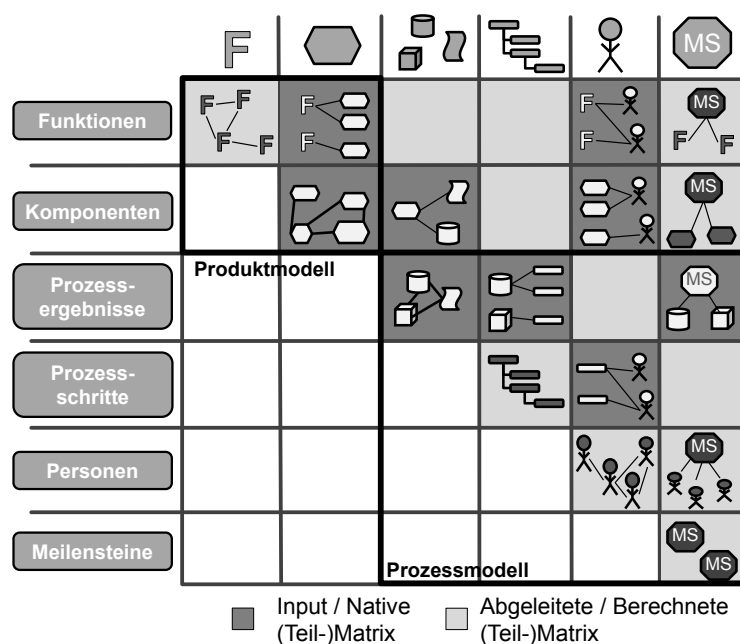


Bild 5-17: Datenakquisition mit nativen und berechneten Daten [nach HELLENBRAND et al. 2010]

Ein weiterer Punkt, der ebenfalls eng mit der Übertragung von Informationen verknüpft ist, ist die **Interpretation** des Modells sowie der darin enthalten Teilmatrizen. In Bild 5-17 sind daher neben den typischerweise verwendeten Eingangsinformationen auch die Bedeutungen der einzelnen Teilmodelle grafisch dargestellt. Diese Darstellung kann zur Kommunikation zwischen Entwicklern, zur Erläuterung der Methodik sowie als Hilfsmittel bei der Informationsakquisition verwendet werden. Dies ist vor allem bei der Einführung der Methodik bei neuen Mitarbeitern hilfreich, da die Matrixdarstellungen nicht intuitiv verständlich (siehe Kap. 5.5.1) sind und diese Darstellung als Hilfsmittel dient.

Dabei muss beachtet werden, welche Relationen die Grundlage für die betrachtete Teilmatrix bilden und ob native oder berechnete Abhängigkeiten verwendet wurden. Dies führt teilweise zu völlig unterschiedlichen Aussagen. Bei berechneten Daten müssen außerdem die Eingangsinformationen betrachtet werden. Für die Interpretation von Strukturanalysen ist relevant, ob beispielsweise in der Funktionsstruktur die Vernetzung von Funktionen aufgrund gemeinsamer Komponenten oder aufgrund der Wirkzusammenhänge (Flussbeziehungen) abgebildet ist. Das in Bild 5-17 dargestellt Modell zeigt somit nur die generischen Aussagen der einzelnen Teilmatrizen. Diese müssen in ihrem jeweiligen Kontext betrachtet werden.

Die hier gezeigten Relationen bilden die Grundlagen für die folgenden Analysen sowie zur Beantwortung der meisten Fragestellungen. Somit kann vermittelt werden, welche Informationen aus welcher Teilmatrix abgeleitet werden können. Interessant ist vor dem Hintergrund der identifizierten Probleme die Identifikation, welche Funktionen oder Komponenten von welchen Meilensteinen betroffen sind, wie Komponenten und Funktionen domänenübergreifend vernetzt sind oder welche Teams über welche Inhalte kommunizieren müssen. Auf diese Punkte wird in den beiden nachfolgenden Kapiteln zur Prozessplanung sowie zur Prozessanalyse eingegangen.

## 5.6 Planung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse

Mit der Darstellung des integrierten Produkt- und Prozessmodells sind die Rahmenbedingungen für die Prozessplanung bzw. -analyse geschaffen. Der Zielsetzung der Schritte des Planungsmoduls ist die Erstellung eines Soll-Prozessplans, der Abhängigkeiten in der Produktstruktur berücksichtigt und somit eine optimale Synchronisation der beteiligten Disziplinen ermöglicht. Die Prozessplanung stellt somit den **präskriptiven Anteil** der Methodik dar.

Im Rahmen der Prozessplanung können zwei Anwendungsfälle identifiziert werden. Zum einen die **Planung des Entwicklungsprozesses** auf Grundlage des Produktmodells zur Aufstellung eines Sollprozesses. Der zweite Punkt ist die Unterstützung bei der **Anpassung bzw. Optimierung eines laufenden oder existierenden Prozesses**. Da die Planung in mehreren Konkretisierungsstufen abläuft (siehe unten), kann der zweite Fall als detailliertere Phase des ersten Falls angesehen werden.

Weiterhin sollen unterschiedliche Ansätze zur Strukturierung des Prozesses unterstützt werden. Zum einen das hier entwickelte Vorgehen zur **funktionsorientierten Prozessplanung** auf Grundlage der Produktarchitektur, welches ohne weitere Randbedingungen durchgeführt werden kann. Zum anderen die häufig in der Industrie eingesetzte **Verwendung vordefinierter Meilensteine**, zu denen spezifische Anforderungen erfüllt bzw. vorgeschriebene Prozessergebnisse vorhanden sein müssen (vgl. [ECKERT & CLARKSON 2010]).

Die **funktionsorientierte Planung** mechatronischer Produkte erfolgt in Anlehnung an etablierte Vorgehensmodelle zur Prozess- bzw. Projektplanung (siehe Kap. 3.4.1, eine grafische Darstellung siehe Anhang 9.4). Die Grundstruktur wurde übernommen, jedoch werden in dieser Arbeit lediglich die Schritte bis einschließlich der Ablaufplanung im Detail behandelt. Auf die Terminplanung wird im Rahmen der Plausibilitätsbetrachtungen hingewiesen, jedoch wird deren Durchführung nicht explizit unterstützt. Das Risikomanagement ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Eine zentrale Rolle nimmt der Grundgedanke der integrierten Betrachtung von Produkt- und Prozessstruktur ein. Die Produktentwicklung wird als Auswahl und Festlegung bzw. Konkretisierung von Artefakten aufgefasst, deren Struktur somit die Struktur des Entwicklungsprozesses wesentlich beeinflussen (vgl. BALDWIN & CLARK 2000, S.42F).

Die Erstellung des Prozessmodells verläuft iterativ und folgt dem aus dem Systems Engineering bekannten Grundprinzip „Vom Abstrakten zum Konkreten“. In einer ersten Iterationschleife wird auf Basis der Produktarchitektur zunächst eine Grobstrukturierung des Prozesses vorgenommen und ein abstrakter Prozessplan erstellt. Dieser wird in Bezug auf mögliche Inkonsistenzen und Optimierungspotentiale hin analysiert (Plausibilitätskontrolle) und in einem

folgenden Durchlauf weiter detailliert. Auf diese Weise kann mittels fortlaufender Konkretisierung der finale Prozessplan bis auf Ebene von Prozessschritten erstellt werden.

Zur **Planung des Prozesses** wird zunächst die Architektur des technischen Produktes aus unterschiedlichen Perspektiven analysiert (siehe Bild 5-18). Im Fokus stehen unterschiedliche Ausprägungen der Funktionsstruktur. Mittels struktureller Kennzahlen und Charakteristika wird zunächst die Festlegung funktional definierter Meilensteine durchgeführt. In Kombination mit der Wirkstruktur können daraus die zum Erreichen der Meilensteine erforderliche Prozessergebnisse sowie deren Ausprägung und Reihenfolge abgeleitet werden. Diese bilden die Grundlage für die Ableitung und Verknüpfung von Prozessschritten, die zu ihrer Erstellung erforderlich sind. Somit liegt ein **struktureller Prozessplan** vor, der mittels detaillierter Analysen einer Plausibilitätsprüfung in Bezug auf Abhängigkeiten in der Produktarchitektur hin unterzogen werden kann. Diese Analysen können die Ableitung weiterer Teilmatrizen zur detaillierteren Systemanalyse enthalten (siehe Kap. 5.7) und sich auf die Verknüpfung der Meilensteine, die realisierten Funktionen sowie den Abgleich mit der Funktions- bzw. Wirkstruktur beziehen. Die Anknüpfung von Personen kann alternativ über die Prozessschritte, Funktionen, Komponenten oder einer Kombination erfolgen.

Diese Ergebnisse bilden die Grundlage zur weiteren Detaillierung des Prozessplans. Zusätzlich zur Strukturplanung ist eine separate **Terminplanung** erforderlich, die ebenfalls in der Plausibilitätsprüfung berücksichtigt werden muss. Dazu kann das integrierte Produkt- und Prozessmodell nicht verwendet werden, da es lediglich die Struktur des Prozesses abbildet. Es können stattdessen vorhandene Methoden zur Planung und Darstellung von Terminplänen verwendet (z. B. Gantt-Charts) werden. Abhängig von den bestehenden Randbedingungen ist eine Anpassung der Reihenfolge von Prozessschritten oder Meilensteinen erforderlich.

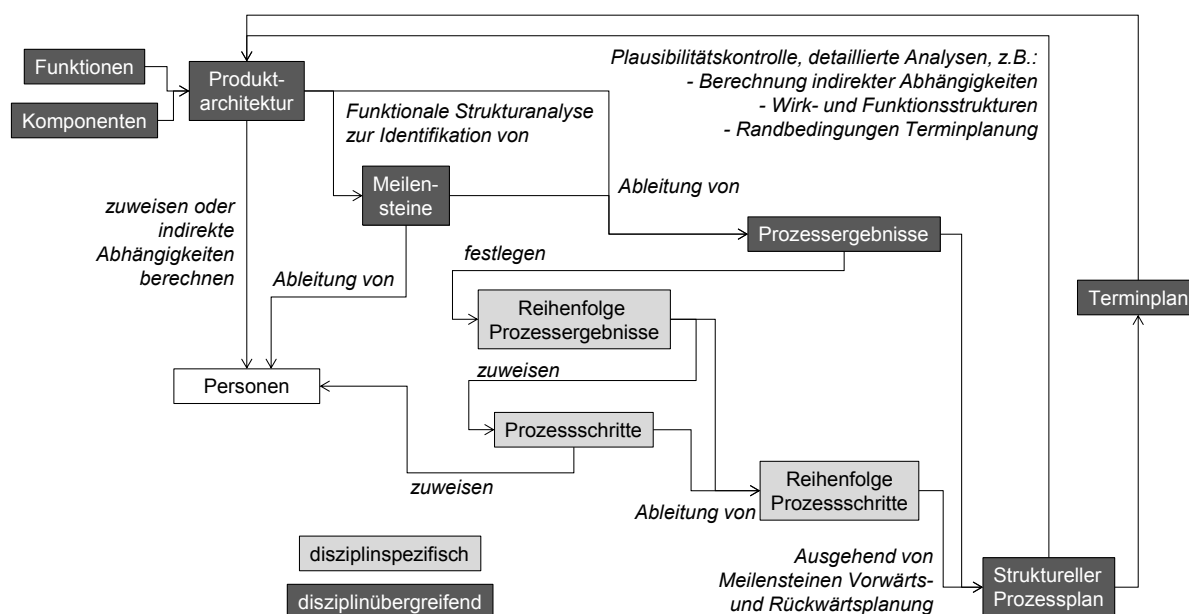


Bild 5-18: Vorgehen zur funktionsorientierten Prozessplanung mechatronischer Entwicklungsprozesse [in Anlehnung an HELLENBRAND & LINDEMANN 2011]

### 5.6.1 Identifikation von Meilensteinen und Erstellung des Prozessplans

Das oben beschriebene Vorgehen zur Prozessplanung kann bezogen auf einen Iterationszyklus in zwei Phasen unterteilt werden. Den ersten Schritt bildet die Identifikation von disziplinübergreifenden, funktionsabprüfenden bzw. -integrierenden Meilensteinen. Eng damit Verknüpft ist die Ableitung disziplinübergreifender und disziplinspezifischer Prozessergebnisse. Somit liegt eine Grobstrukturierung des Prozesses in Entwicklungsphasen vor. Den zweiten Teil bildet die Detaillierung der Phasen zwischen den Meilensteinen mit der Synchronisation der Prozessschritte und der beteiligten Personen.

Zur Grobplanung der Prozessstruktur im Rahmen der Prozessplanung können wie oben angesprochen zwei alternative Ansätze unterschieden werden. Die eine Möglichkeit ist die *Analyse der Produktstruktur* zur funktionsorientierten Identifikation von Meilensteinen und Ableitung eines synchronisierten Sollprozessplans. Die zweite Möglichkeit, welche den Gegebenheiten in der industriellen Praxis entgegenkommt, ist die *Verwendung vordefinierter Meilensteine* als Grundstruktur [ECKERT & CLARKSON 2010]. Dieser Fall kann als eine spezifische Ausprägung des entwickelten Vorgehens (Bild 5-18) angesehen werden. Da bereits eine Zuordnung von Funktionen oder Prozessergebnissen zu Meilensteinen vorliegt, wird an der entsprechenden Stelle in das Modell eingestiegen. Ausgehend von dieser Basis kann eine Detaillierung und Optimierung des Entwicklungsprozesses erfolgen. Es ist auch eine Kombination aus beiden Vorgehensweisen möglich, um beispielsweise eine unternehmensweite Standardisierung von Entwicklungsprozessen über unterschiedliche Projekte zu unterstützen.

Es existieren zur Unterstützung der Planung mechatronischer Entwicklungsprozesse bereits matrixbasierte Ansätze zur Ableitung von Prozessschritten und deren Reihenfolge. Diese berücksichtigen die Abhängigkeiten in der Architektur nur unzureichend (vgl. Kap. 3.5) und sind zudem **bauteil- bzw. komponentengetrieben**. Sie ziehen dementsprechend als Eingangsinformation spezifische Ausprägungen der Komponentenstruktur heran. So verwenden beispielsweise [SCHUH et al. 2009, S.54FF] eine aggregierte Sichtweise aus den drei Flussarten (siehe Kap. 3.1.2) und der geometrischen Sicht. Ferner werden auch indirekte Abhängigkeiten der Komponenten bei der Festlegung der Entwicklungsreihenfolge berücksichtigt.

Bei dieser Vorgehensweise können zwei **grundsätzliche Strategien** mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen angewandt werden. Zum einen kann Komponenten mit **hoher Aktivsumme bzw. Aktivität** eine hohe Priorität zugeordnet werden und diese zu Beginn der Entwicklung bearbeitet werden. Somit sind die zentralen Elemente und deren Relationen im System festgelegt und die weiteren Komponenten können an den Ausprägungen dieser „Ankerpunkte“ ausgerichtet werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die zentralen Komponenten mit ihren Eigenschaften und Schnittstellen früh festgelegt sind und somit die Unsicherheit in der Entwicklung der übrigen Elemente erheblich reduziert wird. Ein wesentlicher Nachteil besteht darin, dass dadurch weniger Flexibilität und Änderungsmöglichkeiten im Entwicklungsprozess vorhanden sind. Potentielle Änderungen der zentralen Bauteile strahlen auf viele weitere Elemente aus und können so zu einem erheblichen Aufwand führen. Dies kann vor allem in späten Phasen zu erheblichen Kosten oder Verzögerungen führen.

Die zweite Strategie ist die entgegengesetzte Vorgehensweise, in der Komponenten mit **niedriger Aktivsumme bzw. Aktivität** eine hohe Priorität erhalten und dementsprechend zuerst bearbeitet werden. Diese Komponenten beeinflussen keine bis wenige andere Elemente und

besitzen dementsprechend auch wenige Schnittstellen. In diesem Ansatz werden zentrale Elemente der Struktur möglichst lange unbestimmt gelassen, um so eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden und Optionen über einen möglichst langen Zeitraum in der Entwicklung zu ermöglichen. Nachteil des Vorgehens ist, dass durch die Konkretisierung der aktiven Bauteile wiederum Änderungen an den zu Beginn festgelegten Komponenten erforderlich sind.

Eine absolute Aussage, welche dieser Strategien grundsätzlich besser geeignet ist, kann nicht getroffen werden. Die Auswahl ist stets abhängig von den spezifischen Randbedingungen bzw. Einflussfaktoren auf die Entwicklung und kann nicht allgemeingültig festgelegt werden.

Wie bereits angesprochen sind die bisherigen Ansätze komponentengetrieben. In der Entwicklung mechatronischer Produkte wird hingegen eine starke Funktionsorientierung angestrebt (vgl. Kap. 2.3). In Konsequenz sollten somit auch Entwicklung und Integration von Funktionen eine zentrale Stellung einnehmen und die Planung des Entwicklungsprozesses auf **Basis von Funktionsstrukturen** erfolgen. Eine einfache Übertragung der beschriebenen Strategien von Komponenten auf Funktionen ist nicht möglich, da mechatronische Funktionen in der Regel von mehreren Komponenten und Teilfunktionen sowie deren Zusammenwirken realisiert werden. Das Vorgehen muss daher entsprechend modifiziert und angepasst werden.

Der **Grundgedanke zur Festlegung der Entwicklungsreihenfolge** wird aus dem Verständnis der Funktionsrealisierung abgeleitet. Nach dem hier verwendeten Verständnis wird eine mechatronische Funktion durch das Zusammenwirken mehrere Funktionen auf einer konkreteren Ebene realisiert. Diese untergeordneten Funktionen können somit als Funktionselemente interpretiert werden, die theoretisch beliebig zu höherwertigen Funktionen kombiniert werden können. Die daraus abgeleitete Strategie ist, zunächst diese einzelnen Funktionselemente mit klaren Schnittstellen zu realisieren und separat abzusichern. Im Anschluss erfolgt durch deren Integration und damit der Sprung auf die nächsthöhere Abstraktionsebene.

Hierbei werden zunächst die Funktionen entwickelt, die wenig vernetzt sind und somit klare Schnittstellen zu den übrigen Systemfunktionen aufweisen. Diese gering vernetzten Funktionen stellen zumeist grundlegende Basiselemente bzw. Basisfunktionalitäten des Systems dar. Die hochvernetzten Funktionen hingegen ermöglichen das Zusammenwirken der übrigen Funktionen und stellen somit die integrativen Elemente der Struktur dar. Zu ihrer Realisierung müssen dementsprechend viele Ausprägungen der übrigen Funktionen bekannt sein, da sie zumeist die Kernelemente der höheren Systemfunktionen bilden. Bei diesem Vorgehen muss zusätzlich beachtet werden, welche Abhängigkeiten zwischen den Funktionen aufgrund der Wirkstruktur bestehen. Ein analoges Konzept wird auch im Systems Engineering, in der Softwareentwicklung sowie bei modular aufgebauten Produktstrukturen angewandt.

Mit dieser Strategie soll der oben beschriebene Zielkonflikt entschärft werden, möglichst die Unsicherheit in der Entwicklung zu minimieren und gleichzeitig viele Freiheitsgrade zu ermöglichen. Da die Systemfunktionen auf den höheren Abstraktionsebenen durch die Integration und das Zusammenwirken von tieferliegenden (technischen) Funktionen geschaffen werden, können durch Neukombination bzw. das Hinzufügen weiterer Teilfunktionen auch in späten Phasen Änderungen, Erweiterungen oder Anpassungen vorgenommen werden. Diese Anpassungen betreffen in erster Linie die Funktionen auf den hohen Ebenen und sie besitzen somit keine oder nur geringe Auswirkungen auf die tieferliegenden Elemente der Struktur. Zudem werden in der Mechatronik die System- und Kundenfunktionen in hohem Maße durch

Softwareelemente, und damit nichtphysische Komponenten, realisiert (vgl. Kap 2.1). Da diese im Vergleich zu physischen Komponenten sehr schnell geändert werden können, sind somit auch in späten Entwicklungsphasen Änderungen mit überschaubarem Aufwand möglich. Ein Risiko in diesem Ansatz bildet, dass die wesentlichen Kundenfunktionen erst sehr spät realisiert und getestet werden können. Dies wird am Ende von Kapitel 5.6.2 kurz diskutiert

Die generelle Planung der Prozesse erfolgt somit funktionsorientiert aus hierarchischer Perspektive **Bottom-Up** bzw. bei nichthierarchischen Strukturen „**von außen nach innen**“. Die einzelnen Funktionen auf den unteren (konkreten) Abstraktionsebenen werden zunächst möglichst separat und parallel entwickelt, getestet und anschließend integriert. Somit ist durch dieses Vorgehen in der Planung sichergestellt, dass die Funktionen zunächst auf einer bestimmten (niedrigeren) Ebene abgesichert wurden und somit mögliche Fehler in der Integration zu suchen sind. Hierzu müssen zunächst die grundlegenden Funktionen sowie deren Vernetzung in der Gesamtstruktur identifiziert werden. Weiterhin müssen Abhängigkeiten zwischen den Funktionen berücksichtigt werden, die sich aufgrund von Flussbeziehungen sowie gemeinsam genutzten Komponenten ergeben können.

Den ersten Schritt der **funktionsorientierten Prozessplanung** bildet die somit Erstellung und Analyse von spezifischen Funktionsstrukturen auf Basis der Produktarchitektur. Es werden primär die **physikalische Funktionsstruktur** (Funktionsvernetzung aufgrund von Komponente, ungerichtet), die **Wirkungs-Funktionsstruktur** (Funktionsvernetzung aufgrund Komponenten und deren Interaktion, gerichtet) sowie die **Funktionshierarchie** betrachtet (vgl. Kap. 5.5.3). Diese Strukturen dienen als Eingangsgrößen der Prozessplanung und werden hinsichtlich spezifischer Merkmale und Charakteristika untersucht.

In der **Wirkungs-Funktionsstruktur** werden die Relationen der Funktionen aufgrund von Wirkungen aufeinander (Stoff, Energie, Information) sowie aufgrund geometrischer Abhängigkeiten beschreiben. Sie dient als primäre Quelle für die Festlegung der Reihenfolge zur funktionalen Integration. Es wurden unterschiedliche Strukturcharakteristika hinsichtlich ihrer Eignung zur Festlegung einer Reihenfolge analysiert. Unter den oben genannten Prämissen wurden die **Kritikalität** sowie der **Vernetzungsgrad**<sup>54</sup> der Elemente als geeignete Strukturcharakteristika zur Festlegung der Reihenfolge identifiziert. Die Elemente mit niedriger Kritikalität sowie niedrigem Vernetzungsgrad werden hoch priorisiert und zuerst bearbeitet. Die Identifikation von **Clustern** und stark zusammenhängenden Knoten gibt Hinweise auf gleichzeitig und gemeinsam zu konkretisierende Funktionen. Diese besitzen eine Vielzahl von wechselseitigen Abhängigkeiten und müssen zusammen betrachtet werden. Weiterhin kann die Struktur auf **spezielle Knoten** untersucht werden. So geben *Gelenkknoten* als Verbindungselement zweier Teilstrukturen einen Hinweis auf getrennt voneinander zu entwickelnde Funktionen bzw. Funktionscluster. Gleichzeitig bilden diese die Schnittstellen zwischen den Funktionen und können so zur Integration verwendet werden.

Die **physikalische Funktionsstruktur** ist ungerichtet, daher ist eine Auswertung hinsichtlich Strukturcharakteristika wie Aktiv- oder Passivsumme nicht sinnvoll. Sie gibt an, welche

---

<sup>54</sup> Der Vernetzungsgrad eines Knotens wurde in Anlehnung an den Vernetzungsgrad der Struktur [MAURER 2007, S.132] definiert: Verhältnis von Anzahl der vorhandenen Relationen zur Anzahl der möglichen Relationen. Mögliche Relationen:  $2 * (\text{Anzahl Elemente in der Struktur} - 1)$



Funktionen aufgrund gemeinsamer Komponenten vernetzt sind und eignet sich primär zur Identifikation von **parallel zu entwickelnden Funktionen** bzw. Funktionsgruppen. Hierzu wird sie hinsichtlich **Clustern sowie isolierten Elementen** untersucht. Im Fall von nicht verbundenen Elementen besitzen die Funktionen keine gemeinsamen Komponenten und die Entwicklung kann aus funktionaler Sicht unabhängig und damit parallel erfolgen. Innerhalb der Cluster ist eine detailliertere Analyse, beispielsweise in der Wirkungs-Funktionsstruktur erforderlich. Isolierte Elemente bilden zudem Funktionen außerhalb der betrachteten Entwicklungsumfänge ab (z. B. Unterstützungsfunktionen) und zeigen so übergreifende Abhängigkeiten auf.

In der **Funktionshierarchie** ist das Zusammenwirken von Teilfunktionen zu höheren Systemfunktionen abgebildet. Es wird jedoch lediglich dargestellt, welche Funktionen zur Realisierung einer abstrakten Funktion benötigt werden, nicht deren genaues Zusammenwirken. Somit eignet sich die Funktionshierarchie zur **Plausibilitätsprüfung**, ob eine Funktion mit der geplanten Reihenfolge der Funktionsintegration tatsächlich abgeprüft werden kann. Weiterhin können Aussagen über die notwendige **Ausprägung der Teilfunktionen** getroffen werden. Zusätzlich ist eine Analyse in Kombination mit der Wirkungs-Funktionsstruktur möglich, da die Teilfunktionen einer Funktion häufig in Cluster auftreten. Somit liefert die Funktionshierarchie ebenfalls Hinweise auf **gemeinsam bzw. separat zu entwickelnde Teilfunktionen**.

An dieser Stelle wird nochmals angemerkt, dass, wie bei allen Strukturanalysen, die dargestellten Merkmale und Charakteristika keinen absoluten Charakter aufweisen. Die entsprechenden Struktureigenschaften sind immer auf den betrachteten Kontext sowie in Kombination miteinander zu betrachten (vgl. Kap 3.3.3). Die Strukturanalyse dient somit als Unterstützung für einen Prozessplaner und kann nicht vollständig automatisiert werden.

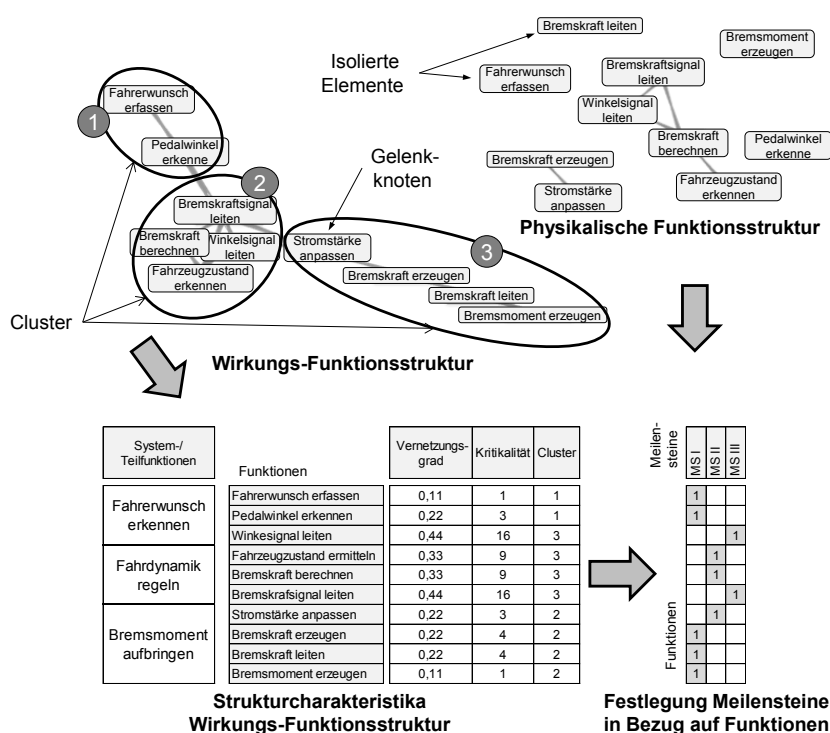


Bild 5-19: Strukturanalysen zur Identifikation von funktionsorientierten Meilensteinen

In Bild 5-19 sind die entsprechenden Analysen der Funktionsstrukturen für das Bremssystem des Go-Karts abgebildet. Es ist erkennbar, dass die Wirkungs-Funktionsstruktur drei Cluster aufweist, die sehr gut mit den Systemfunktionen der Funktionshierarchie übereinstimmen (vgl. Bild 5-11). Aus der Betrachtung von Kritikalität und Vernetzungsgrad ist ersichtlich, dass die zentralen Funktionen „Fahrzeugzustand ermitteln“ und „Bremskraft berechnen“ (entspricht der Regelung des Bremsmoments) eine Vielzahl von Vernetzungen aufweisen und daher erst später im Prozess zu entwickeln sind. Die höchste Vernetzung weisen die beiden Funktionen zur Leitung von Bremskraftsignal bzw. Winkelsignal auf, so dass sich diese für die finale Integration aller Teilsysteme eignen. Die physikalische Funktionsstruktur bestätigt, dass sich die Regelung der Bremskraft sowie die Leitung der Signale in einem Cluster befinden, während die übrigen Elemente isoliert sind. In Kombination mit der Wirkstruktur (siehe Bild 5-13) folgt daraus, dass Bremse, Pedalerie und Bremskraftregelung (Steuergerät) parallel zu entwickeln sind und erst zum Ende integriert werden. Da die Regelung Informationen über die Ausprägung der übrigen Teilsysteme, wie Winkelsignale oder Maximalkraft, benötigt, wird mit ihrer Entwicklung erst nach einer Grobkonzeptionierung der beiden anderen Teilsysteme begonnen.

An der Funktion „Stromstärke anpassen“ kann gezeigt werden, dass die Strukturanalysen lediglich Hinweise auf die Reihenfolge liefern und zusätzlich eine Interpretation sowie die Anpassung an weitere Randbedingungen erforderlich sind. Die physikalische Funktionsstruktur zeigt an, dass diese eng mit der Funktion „Bremskraft erzeugen“ verbunden ist und diese daher gemeinsam entwickelt werden sollten (Bild 5-19). Sie stellt jedoch auch einen Gelenkknoten der Wirkungs-Funktionsstruktur dar und kann somit als Schnittstelle bzw. zur Integration des gesamten Clusters (3) gesehen werden. Aus der Wirkstruktur wird deutlich, dass diese Funktion durch die Leistungselektronik des Linearstellzylinders realisiert wird. Die Entwicklung und funktionale Absicherung der Bremse ist auch ohne Leistungselektronik möglich indem der Aktor direkt mit Strom beaufschlagt wird. Da zudem diese Komponente ein Kaufteil darstellt und nur begrenzte Entwicklungskapazitäten zur Verfügung standen, wurde diese Funktion in den zweiten Meilenstein verschoben.

Mit dem Vorliegen der Meilensteine sind die Grobstruktur des Prozesses und die Einteilung in Phasen vorhanden. Auf dieser Grundlage kann mit der weiteren Planung der Prozessergebnisse begonnen werden. Dazu ist festzulegen, auf welche Art und Weise und mit welchen funktionsabprüfenden Tests bzw. Versuchen die entsprechenden Funktionen abgeprüft werden. Eine Übersicht zu für die Mechatronik relevanten virtuellen Funktionstests (disziplinspezifisch oder -übergreifend) findet sich bei [BENDER 2005, S.58ff].

Aus den zur Funktionsüberprüfung verwendeten Versuchen und Tests kann auf die erforderlichen Zustände der Funktionen und damit, in Kombination mit der Wirkstruktur, auf die notwendigen Ausprägungen der sie realisierenden Komponenten geschlossen werden. Die spezifischen Ausprägungen der Komponenten werden über die **Prozessergebnisse** beschrieben, welche den Meilensteinen zugeordnet werden. Die Reihenfolge der Prozessergebnisse kann aus der Abfolge der Meilensteine abgeleitet werden. Zusätzlich zu den Meilensteinen können die Prozessergebnisse mit den Komponenten verknüpft werden, um die Integration von Produkt- und Prozessstruktur zu erreichen.

Die Prozessergebnisse definieren somit den **Reifegrad der Komponenten** bzw. in aggregierter Sicht den des technischen Systems (siehe Kap. 5.8). Der Reifegrad wird somit in Form der benötigten Prozessergebnisse, wie Anforderungsliste, Konzept, Simulationsmodell, virtuelles Geometriemodell oder Rapid-Prototyping Teil, beschrieben.

Die Modellbildung sowie die Reihenfolge zur Erstellung bzw. Ableitung der entsprechenden Teilmatrizen im integrierten Systemmodell ist als Überblick in Bild 5-20 dargestellt. Die Nummern der Pfeile entsprechen denen der Vorgehensschritte im übergeordneten Vorgehensmodell (vgl. Bild 5-8, Anhang 9.6). Mit Vorliegen der Struktur der Prozessergebnisse ist Schritt 5b abgeschlossen.

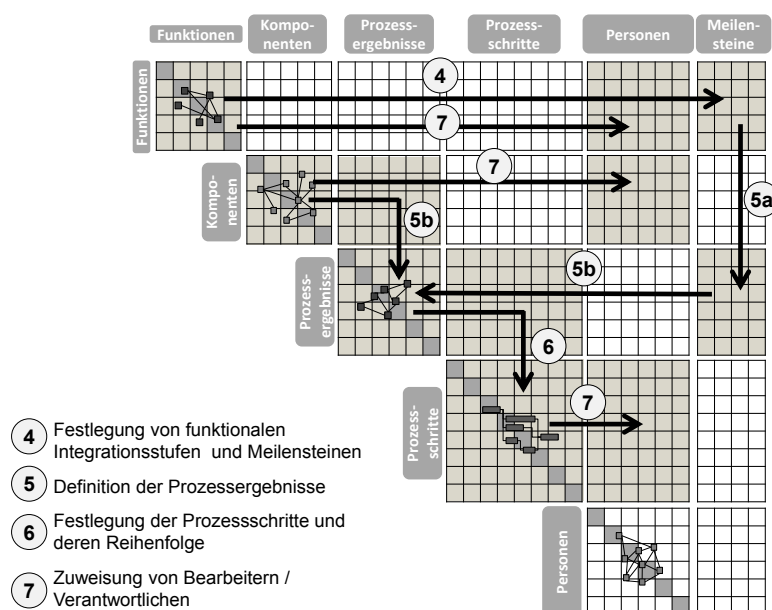


Bild 5-20: Vorgehen zur funktionsorientierten Prozessplanung im integrierten Systemmodell

Auf Grundlage der Prozessergebnisse können die zur ihrer Erstellung erforderlichen **Prozess-schritte** identifiziert werden. Diese können mit den entsprechenden Prozessergebnissen sowie untereinander vernetzt werden. Bei der Modellbildung ist zu beachten, dass die entsprechende Relation zur Verknüpfung von Prozessergebnissen und Prozessschritten im Metamodell passiv formuliert ist („wird erzeugt von“). Die Einträge der Matrix bilden somit bei der Leserichtung „Zeile beeinflusst Spalte“ den Output eines Prozessschrittes ab. Bei der Ableitung und Analyse von indirekten Abhängigkeiten (vgl. Kap. 5.7) ist dies zu beachten und ggf. die Transponierte zu verwenden.

Mit dem Vorliegen der Prozessschritte zur Erstellung der Prozessergebnisse ist die *Aufgabenplanung* abgeschlossen und es erfolgt der Übergang zur **Ablaufplanung**. Die Reihenfolge der Prozessschritte sowie deren Verknüpfung kann aus der Struktur der Prozessergebnisse sowie deren Verknüpfung mit Prozessschritten abgeleitet werden (Fall 4, Anhang 9.2). Die Modellierung der Prozessstruktur in der zugehörigen DSM bietet jedoch weitere Möglichkeiten zur strukturellen Prozessanalyse und damit zur Optimierung des Prozessablaufs hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte.



## 5.6.2 Plausibilitätskontrolle und entwicklungsbegleitende Anpassung

Zur Prüfung der Plausibilität des Vorgehens werden primär die Abhängigkeiten im technischen System betrachtet. Es muss gewährleistet werden, dass die geplanten funktionsüberprüfenden Tests in der vorgesehenen Reihenfolge durchgeführt werden können. Dies ist neben der Vernetzung der Funktionen davon abhängig, ob sämtliche Informationen zur Entwicklung der geforderten Ausprägungen der Prozessergebnisse vorhanden sind.

Hierfür werden primär die Funktions- und Wirkstrukturen des technischen Systems verwendet. Mit ihnen kann überprüft werden, ob die abzuprüfenden Funktionen Input aus anderen Funktionen benötigen und ob die entsprechenden Prozessergebnisse in der erforderlichen Ausprägung vorhanden sind. So kann beispielsweise die Funktion „Bremskraft berechnen“ nur getestet werden, wenn die erforderlichen Inputs von Fahrzeugmodell und Bremspedal vorhanden sind. Für den Fall, dass bestimmte Prozessergebnisse nicht vorliegen, kann überprüft werden ob eine andere Form der Absicherung, z. B. virtuell oder Hardware-in-the-Loop, möglich ist, um eine umfangreiche Umplanung zu vermeiden.

Die Umsetzung der Prozessprüfung kann grundsätzlich durch sämtliche in Kap. 5.7 dargestellten Möglichkeiten zur Berechnung und **Analyse direkter und indirekter Abhängigkeiten** im integrierten Systemmodell erfolgen. Eine einfache und schnelle Möglichkeit bietet die *Ableitung der Meilensteinstruktur* auf Grundlage von Prozessergebnissen und deren Verknüpfung mit den Meilensteinen. Hier dürfen die Relationen nur in eine Richtung zeigen und keine Kreisschlüsse oder Doppelkanten auftreten. Ebenso können die Verknüpfungen von Funktionen bzw. Komponenten mit Meilensteinen (oben rechts im Systemmodell) indirekt abgeleitet und mit dem Plan verglichen werden.

Ein grundlegendes Problem von matrixbasierten Prozessplanungsmethoden sind die Einschränkungen in Bezug auf Zeit- und vor allem Terminplanung. Da lediglich die Prozessstruktur abgebildet wird, eignet sich diese Art der Prozessplanung primär für die Festlegung der Reihenfolge sowie für die Parallelisierung und Synchronisation von Prozessschritten (vgl. [BAUMBERGER 2007, S.326]). Die **Terminplanung** muss daher mit Hilfe von separaten Methoden und Hilfsmitteln durchgeführt werden.

Hierfür können aus dem Projektmanagement bekannte Methoden und Darstellungen wie **Gantt-Charts** in unterschiedlichen Ausprägungen verwendet werden (siehe z. B. [BURGHARDT 2008, S.266FF]). Auf die Durchführung der Terminplanung wird hier nicht detailliert eingegangen, es empfiehlt sich jedoch grundsätzlich ebenso das Vorgehen „Vom Groben zum Detail“. Dazu werden zunächst zeitliche Fixpunkte im Prozess identifiziert, z. B. Meilensteine oder Versuchszeiträume (siehe unten), und diese terminlich fixiert. Anschließend kann ausgehend von diesen Terminen eine zeitliche Vorwärts- und Rückwärtsplanung der Prozessschritte erfolgen.

Ein Ansatz zur Modellierung der zeitlichen **Dauer von Prozessschritten** oder Meilensteinen ist die Nutzung der Diagonalen der entsprechenden Teilmatrizen. Analog zur Abbildung der Kosten bei [ZIRKLER 2010, S.110], wird die Zeitdauer der Prozessschritte auf Diagonalen hinterlegt. Die zeitliche Information ist somit im integrierten Produkt- und Prozessmodell enthalten und kann neben der Reihenfolge und Vernetzung der Prozessschritte in die zur Terminplanung genutzten Modelle übernommen werden (Bild 5-22).

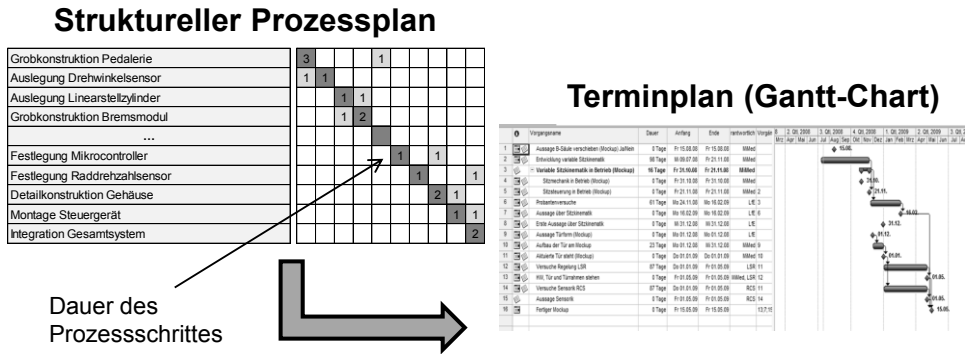


Bild 5-22: Terminplanung auf Basis des strukturellen Prozessplans

Die Terminplanung stellt einen zentralen Teil der Plausibilitätskontrolle dar. Das Erstellen eines über sämtliche Prozessbeteiligte abgestimmten Terminplans kann häufig zu **Identifikation von Konflikten** beitragen, die aus der reinen Struktur nicht erkennbar sind. Diese ergeben sich häufig aus spezifischen Randbedingungen des Unternehmens und Projektes und sind nicht im Prozess selbst angesiedelt. So identifizieren [ECKERT & CLARKSON 2010] eine Reihe von Faktoren, die im Rahmen der Planung berücksichtigt werden und den Entwicklungsprozess erheblich beeinflussen. Diese umfassen unter anderen Komponenten mit langen Entwicklungs- oder Fertigungszeiten (z. B. für Modelle oder Prototypen), an denen die übrigen Prozessschritte ausgerichtet werden. Ebenso werden Aktivitäten mit Bezug zu Zulieferern häufig gebündelt und gemeinsam vergeben. Auch Zeitpunkte von funktionsabprüfenden Tests können nicht beliebig gewählt werden, da spezifische Randbedingungen berücksichtigt werden müssen (z. B. Wetter) oder die Nutzung von externen Ressourcen erforderlich ist. Schließlich müssen die im Unternehmen verfügbaren Ressourcen (Personal, Kompetenzen, Sachmittel, Finanzen) beachtet werden, die unter Umständen zu den benötigten Zeiten nicht oder nicht in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Während der Prozessdurchführung können in diesem Bereich durch Krankheit oder Weggang von zentralen Entwicklern auch spontan erhebliche Verschiebungen auftreten.

Ein weiterer Punkt ist die **Überprüfung, Detaillierung und Anpassung des Prozessplans** und damit die *Änderung integrierter Produkt- und Prozessmodells*. Diese Anpassungen können in der Planungsphase infolge von in der Plausibilitätsprüfung identifizierten Konflikten, zur weiteren Konkretisierung oder im Verlauf der Prozessdurchführung aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen erforderlich sein. Die Analyse von Änderungsauswirkungen in Bezug auf Produkt und Prozess wird detailliert in Kap. 5.7 dargestellt. Im Fall von Entwicklungsverzögerungen oder Terminverschiebungen ist anhand der Terminplanung zu überprüfen, ob und welche Änderungen an der Prozessstruktur erforderlich sind.

Die bei Anpassungen des Entwicklungsprozesses erforderlichen Änderungen am integrierten Produkt- und Prozessmodell können in Form von Hinzufügen, Erweitern, Entfernen, Zusammenfassen, etc. von Elementen und Relationen auftreten. Im Fall der Änderungen von Elementen müssen die entsprechenden Zeilen im Modell eingefügt bzw. entfernt, und die zugehörigen domänenspezifischen und domänenübergreifenden Relationen entsprechend mit an-

gepasst werden. Hierbei ist zu ermitteln, welche neuen Relationen der neuen bzw. geänderten Elemente die ursprünglichen Abhängigkeiten im System korrekt beschreiben. Die Änderung von Relationen gestaltet sich deutlich einfacher, da hier lediglich die Einträge in der Matrix verändert werden. Die Anpassung des Modells erfolgt in der hier vorliegenden Arbeit noch manuell und ist bei großen Systemen entsprechend komplex. Mit einem geeigneten Rechnerwerkzeug kann der erforderliche Aufwand erheblich reduziert werden. Für eine formalisierte Behandlung zur Beschreibung von Strukturveränderungen wird auf [EBEN et al. 2008; HELMS et al. 2009] verwiesen.

In Bild 5-23 ist die Detaillierung des Prozessschrittes „Grobkonzept Pedalerie erstellen“ in mehrere Einzelschritte dargestellt. Diese neuen Prozessschritte sowie die zugehörigen neuen Prozessergebnisse werden in das Modell eingefügt und die Relationen ergänzt. Gleichzeitig werden die ursprünglichen Elemente sowie Relationen entfernt.

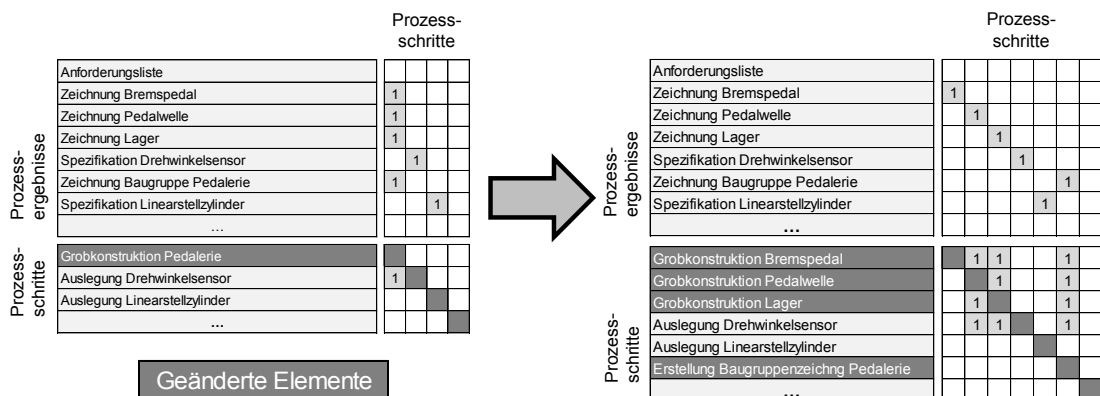


Bild 5-23: Änderung des Systemmodells am Beispiel der Detaillierung eines Prozessschrittes

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das integrierte Systemmodell zumindest auf der Architekturseite quasi-statisch ist. Da der Fokus der Unterstützung auf Serienentwicklungsprozessen liegt, in denen die Stimmigkeit des Konzeptes durch entsprechende Vorentwicklungen bereits abgesichert ist, sind im Normalfall keine wesentlichen Änderungen an der Architektur erforderlich. Weiterhin werden die Prozessschritte nicht bis auf eine operative Arbeitsebene detailliert (vgl. Kap. 5.2.2). Somit ist eine Vielzahl von Iterationen in den Prozessschritten enthalten. Die Iterationen werden dadurch gefiltert und erfordern keine Anpassung des Modells während der Prozessdurchführung. Somit kann nach Abschluss der Planung ebenfalls von einem quasi-statischen Modell ausgegangen werden. Damit wird der Ansatz von [DEMERS 2000] aufgegriffen, bei dem Vollständigkeit des Prozesses lediglich auf einer abstrakten Ebene vorhanden ist und dadurch eine Orientierung für die Entwickler bietet.

Zum Abschluss dieses Kapitels werden das **Risiko** sowie die **Effizienz** des gewählten Vorgehens zur Festlegung der Entwicklungsreihenfolge betrachtet. Durch die „Bottom-Up Funktionsrealisierung“ werden die zentralen mechatronischen Funktionen, in denen die vom Kunden erwartete und wahrnehmbare Funktionalität des technischen Systems enthalten ist, sehr spät im Prozess entwickelt. Somit können auch eventuelle Fehler in diesen Funktionen erst spät entdeckt werden. Die Behebung dieser Fehler kann in späten Phasen einen erheblichen

Aufwand verursachen oder Auswirkungen auf die Produkteinführung haben. Dieses Risiko wird jedoch als vertretbar eingeschätzt, da die Funktionen „nach unten“ immer abgesichert und der Fehler somit in den integrierenden Funktionen auf der obersten Ebene (zumeist Software) zu lokalisieren ist. Zudem werden Serienentwicklungen betrachtet, in denen das Konzept bereits verifiziert ist.

Eine Alternative zur Senkung des Risikos ist die Verwendung virtueller Hardware um eine frühere Entwicklung und Absicherung der Software zu ermöglichen. Dies erfordert jedoch zusätzlichen Aufwand zur Modellierung der virtuellen Umgebung und einen zweiten Integrationstest mit realer Hardware. Ein Vergleich dieser beiden Vorgehensweisen in Bezug auf die Effizienz muss noch durchgeführt werden.

## 5.7 Entwicklungsbegleitende Analyse und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse

Mit Abschluss der Planung bzw. der Modellierung des Entwicklungsprozesses liegt ein integriertes Systemmodell zur Beschreibung von Produkt und zugehörigem Entwicklungsprozess vor. Zur Erreichung einer optimalen Synchronisation der Disziplinen ist die Erstellung eines abgestimmten Sollprozesses nicht ausreichend. Im Verlauf der Entwicklung treten zwangsläufig Abweichungen von den Vorgaben auf die Veränderungen am technischen Produkt bzw. im Entwicklungsvorgehen erfordern. Somit ist stets auch eine entwicklungsbegleitende Unterstützung erforderlich. Diese **entwicklungsbegleitende Synchronisation** stellt somit einen **deskriptiven Anteil** der Methodik dar.

Die Synchronisation der Disziplinen wird im Verlauf der Prozessdurchführung im Wesentlichen durch zwei Maßnahmen unterstützt. Zum einen die Analyse und Visualisierung von disziplin- und domänenübergreifenden **Wirk- und Änderungsauswirkungen**. Mit diesem verbesserten Systemverständnis soll erreicht werden, dass im Fall von Änderungen die richtigen Personen informiert werden bzw. diese sich abstimmen können. Die Kenntnisse dieser Auswirkungen sind eng mit der **Unterstützung von Entscheidungen** im Prozess verbunden. Somit wird durch die Bereitstellung von möglichen Auswirkungen auf das sozio-technische Gesamtsystem eine Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt.

Die zweite Unterstützungsmaßnahme ist die **Verbesserung der Kommunikation** zwischen den Prozessbeteiligten **sowie von Abstimmungsinhalten**. Der erste Teil wurde bereits mit der zielgerichteten Kommunikation im Falle von Änderungen angesprochen. Allgemein betrachtet sollen sich die Abhängigkeiten von Produkt- und Prozessstruktur in der Zusammensetzung von Teams und Besprechungen widerspiegeln (vgl. [BALDWIN & CLARK 2000]). Somit kann erreicht werden, dass die richtigen Personen mit dem richtigen Integrationsgrad in die Entwicklung eingebunden werden. Dies kann auch zur Ableitung bzw. Gestaltung der Aufbauorganisation im Unternehmen genutzt werden. Der letzte Punkt bezieht sich auf die Inhalte der Kommunikation bzw. von Besprechungen. Den Entwicklern werden Informationen zur Verfügung gestellt, welche Funktionen bzw. Komponenten in der aktuellen Entwicklungsphase relevant sind. Auf dieser Grundlage können die Inhalte von Besprechungen bzw. allgemeiner Kommunikation ausgewählt werden.



### 5.7.1 Analyse von Wirk- und Änderungsabhängigkeiten

Die Analyse von Wirk- und Änderungsauswirkungen ist eine zentrale Herausforderung im Umfang mit komplexen Produkten. Der Entwicklungsprozess ist geprägt von einer Vielzahl von situationsabhängigen Entscheidungen (siehe z. B. [KRISHNAN & ULRICH 2001; WYNN 2007; CHALUPNIK et al. 2009]). Diese sind häufig eng mit Änderungen der Produkt- bzw. Prozessstruktur verbunden. Es existieren daher im Änderungsmanagement eine Vielzahl von Ansätzen, die sich mit der systematischen Erfassung, Darstellung und Bewertung von Änderungen sowie deren Fortpflanzung und Auswirkungen befassen (siehe Kap. 3.4.3).

Die Gründe für Entscheidungen bzw. die Notwendigkeit von Änderungen können auf vielfältige Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen auf die den Entwicklungsprozessen inhärente Unsicherheit aufgrund der Unbestimmtheit des Ergebnisses (siehe Kap. 3.4.1). Durch die zunehmende Konkretisierung und den damit einhergehenden Erkenntnisgewinn müssen kontinuierlich Entscheidungen in Bezug auf die technischen Komponenten sowie das weitere Vorgehen getroffen werden. Dieses iterative Vorgehen aus Synthese und Analyse ist charakteristisch für die Produktentwicklung und tritt auch in Serienentwicklungsprozessen auf. Die Iterationen treten zum überwiegenden Teil innerhalb einer Disziplin bzw. in Bezug auf die von einem Entwickler bearbeiteten Arbeitsumfänge auf. Bei größeren Abweichungen von der Zielstellung können sich auch Änderungen ergeben, die über die verantworteten Arbeitsumfänge sowie die eigene Disziplin hinausgehen und somit nicht mehr in die Kompetenz eines Entwicklers fallen.

Diese weitreichenden Zielabweichungen können beispielsweise durch fehlgeschlagene oder nicht erwartungsgemäß abgeschlossene (Integrations-)Tests, Fehler in der Zieldefinition bzw. im Produktkonzept, unvorhergesehene Probleme wie die Nichtrealisierbarkeit einer Lösung, Ausfall von (Entwicklungs-)Kapazitäten (Entwickler über längeren Zeitraum krank), Terminverschiebungen aufgrund interner (Entwicklungsdauer länger als vorgesehen) oder externer Einflüsse (Dienstleister kann nicht liefern, Lieferant fällt aus, Komponenten nicht verfügbar, etc.) entstehen. In jedem dieser Fälle müssen Entscheidungen getroffen werden, die sich auf Produkt und Entwicklungsprozess auswirken.

Die bestehenden Ansätze haben meist die Zielsetzung, mögliche Änderungen vorherzusehen, die Auswirkungen abzuschätzen zu bewerten, um daraus entsprechende Maßnahmen zur Gestaltung des Systems abzuleiten. Daher werden Änderungs- und Beeinflussungswahrscheinlichkeiten modelliert und daraus eine Bewertung in Form von Aufwand, Kosten oder Zeitverzug vorgenommen. Die Betrachtungen können sich auf das technische Produkt, den Entwicklungsprozess sowie eine Verknüpfung von beiden beziehen. Ein weiterer Anwendungsfall ist die angesprochene Entscheidungsunterstützung bei Änderungsanträgen zur gezielten Beeinflussung von Produkteigenschaften (z. B. zur Behebung von Qualitätsproblemen).

Im hier betrachteten Anwendungsfall werden **potentielle Wirk- und Änderungsauswirkungen** innerhalb des sozio-technischen Systems der mechatronischen Produktentwicklung analysiert und visualisiert. Zur Unterstützung der Synchronisation ist es elementar, dass die Entwickler über Abhängigkeiten zwischen den Disziplinen informiert sind bzw. im Änderungsfall über diese informiert werden. Die Zielsetzung ist somit, mögliche Auswirkungen und Abhängigkeiten im System zu **erfassen** und sie den Entwicklern bzw. Verantwortlichen **transparent zur Verfügung zu stellen**. Diese können entsprechend den identifizierten Abhängig-

keiten eine Entscheidung fällen oder die entsprechenden Personen informieren. Hierbei werden sämtliche potentielle Abhängigkeiten berücksichtigt und keine Differenzierung bezüglich der Art sowie einer tatsächlich vorhandenen Auswirkung vorgenommen. Der Anwender muss auf Grundlage der ihm zur Verfügung gestellten Informationen entscheiden, ob diese Relation in der Situation relevant ist und ob eine Veränderung eines Elementes tatsächlich Auswirkungen auf die übrigen Elemente besitzt.

Zur **Analyse und Optimierung eines vorliegenden Systemmodells** mit potentiellen Abhängigkeiten wird im strukturellen Komplexitätsmanagement (siehe Kap. 3.3.3) die Verwendung eines *Strukturhandbuchs* [MAURER 2007, S.136] vorgeschlagen. In diesem werden unterschiedliche Methoden zur Analyse komplexer Systemstrukturen bereitgestellt. Mit dem integrierten Produkt- und Prozessmodell sind die notwendigen Voraussetzungen vorerfüllt und die Methoden können entsprechend dem betrachteten Anwendungsfall angewandt bzw. übertragen werden. Im vorliegenden Fall sind vor allem potentielle disziplin- und domänenübergreifende Abhängigkeiten von Interesse. Zudem können disziplinübergreifende Wirkketten im System aufgestellt werden, die beispielsweise zur Plausibilitätsprüfung der Prozessplanung oder der Ableitung von Tests herangezogen werden können (siehe Kap. 5.6). Die Modellierung der verschiedenen Disziplinen bzw. Domänen (Partitionierung) erfolgt über unterschiedliche Färbungen der jeweiligen Elemente in der MDM (Zeilen/Spalten) bzw. in den entsprechenden Graphen (vgl. Kap. 5.5.2).

Zu den im strukturellen Komplexitätsmanagement vorgeschlagenen Methoden der Systemanalyse sind für den vorliegenden Anwendungsfall primär die *Auswirkungsanalyse* (feed-forward analysis), die *Einfluss-Checkliste* (impact check list) sowie die *Rückverfolgungsanalyse* (trace-back analysis) [MAURER 2007, S.136FF] relevant. Diese werden im Folgenden kurz erläutert. Sämtliche Methoden können sowohl manuell wie auch rechnergestützt durchgeführt werden.

In der **Auswirkungsanalyse** werden potentielle Wirk- und Änderungsabhängigkeiten ausgehend von einem bestimmten Element im System betrachtet. Bei dieser Analyse werden nur die vom Ursprungselement wegzeigenden Relationen betrachtet. Somit ist die Identifikation von potentiell betroffenen Elementen bei einer Änderung dieses Elementes möglich. Die Verfolgung der Abhängigkeitsketten kann sich über beliebig viele Ebenen bzw. Relationen erstrecken. Es können bei entsprechend großer Reichweite der Analyse somit auch unbekannte bzw. indirekte Abhängigkeiten identifiziert werden, die bisher nicht berücksichtigt werden konnten und somit potentiell für Probleme verantwortlich sind. Der Aufwand zur Analyse sämtlicher Wirkketten ist bei umfangreichen Systemen sehr hoch, da sich eine entsprechend hohe Anzahl an alternativen Abhängigkeitsketten ergibt. Es ist daher während der Analyse vom Anwender zu prüfen ob die identifizierte Relation relevant ist und nur die positiv bewerteten Abhängigkeiten weiter zu verfolgen.

Bei einer **Rückverfolgungsanalyse** wird grundsätzlich das gleiche Vorgehen angewandt, nur dass stattdessen die auf das Ursprungselement gerichteten Relationen betrachtet werden. Es können somit potentielle Wirkketten identifiziert werden, die zu einer Änderung oder Auswirkung auf das Element führen. Es können somit Elemente oder Bereiche im System identifiziert werden, die aufgrund ihrer Auswirkungen zu kritischen oder zentralen Elementen nicht geändert werden dürfen oder besonders intensiver Aufmerksamkeit in der Entwicklung bedür-

fen. Die Unterscheidung in Auswirkungs- und Rückverfolgungsanalyse ist nur für gerichtete Graphen relevant. In ungerichteten Fall kann die Analyse analog durchgeführt werden, das Ergebnis ist jedoch in beiden Fällen identisch.

Die **Einfluss-Checkliste** ist eine systematische Zusammenstellung von Elementen, die direkte Relationen zu dem betrachteten Element aufweisen. Es handelt sich somit um eine Wirkkette der Länge Eins. Die Analyse kann dabei analog zu den oben beschriebenen Elementen in Bezug auf aktive sowie passive Abhängigkeiten erfolgen. Ebenso ist eine kombinierte Betrachtung möglich. Im Unterschied zur Auswirkungs- und Rückverfolgungsanalyse werden Abhängigkeiten zwischen den mit dem betrachteten Element verknüpften Elementen nicht betrachtet. Im Fokus steht die systematische Erfassung von aktiven und passiven Abhängigkeiten eines Elementes. Die Einfluss-Checkliste kann somit als Grundlage bzw. im Rahmen einer Auswirkungs- und Rückverfolgungsanalyse verwendet werden.

Auf Grundlage des integrierten Produkt- und Prozessmodells können mit den beschriebenen Methoden die Auswirkungen disziplin- und domänenübergreifend analysiert und visualisiert werden. Es kann somit beispielsweise untersucht werden, welche Funktionen bei Änderung einer Komponente betroffen sind (und umgekehrt), welche Prozessergebnisse und Prozessschritte davon beeinflusst werden und welche Personen infolgedessen informiert werden müssen. Hierbei sind vor allem disziplinübergreifende Abhängigkeiten von Interesse, da diese häufig unbekannt sind und zu Iterationen in den späteren Entwicklungsphasen führen können (vgl. Kap. 2.2). Die konkret durchzuführenden Analysen sind abhängig von der betrachteten Aufgaben- bzw. Fragestellung und können hier nicht allgemein angegeben werden.

Da im Systemmodell eine Vielzahl unterschiedlicher Abhängigkeiten aggregiert abgebildet werden sowie gerichtete und ungerichtete Relationen gleichzeitig auftreten, empfiehlt sich die kombinierte Betrachtung von aktiven und passiven Abhängigkeiten. Da in jedem Fall eine Bewertung durch den Anwender erforderlich ist, ist somit sichergestellt dass keine potentiellen Auswirkungen im System übersehen werden.

In Bild 5-24 oben ist beispielhaft die Betrachtung von potentiellen Wirkketten für den „Drehwinkelsensor“ sowie unten die Einfluss-Checkliste für den Prozessschritt „Implementierung Fahrdynamikregelung Konzept“ dargestellt. Aus der gezeigten disziplin- und domänenübergreifenden Auswirkungsanalyse (oben im Bild) ist die Problematik der in der Einleitung der Arbeit angesprochenen Abhängigkeit zwischen der Fahrdynamikregelung und der Lage des Drehwinkelsensors erkennbar. Im Gegensatz zu den direkten Auswirkungen des Sensors auf Lager und Pedalwelle (geometrische Schnittstelle), liegt die Abhängigkeit zur Fahrdynamikregelung erst über zwei Stufen vor. Obwohl der Sensor nicht verändert wurde, ergibt sich durch die geänderte Einbaulage eine neue Spezifikation der Ausgangssignale. Diese müssen bei der Konzeptionierung bzw. der Implementierung der Fahrdynamikregelung berücksichtigt werden. Mittels Auswirkungsanalyse können diese indirekten Abhängigkeiten bereits in der Planung oder frühzeitig im Prozess erkannt und entsprechend berücksichtigt werden. In diesem Fall ist eine Kommunikation zwischen dem Entwickler des Drehwinkelsensors sowie dem der Fahrdynamikregelung erforderlich.

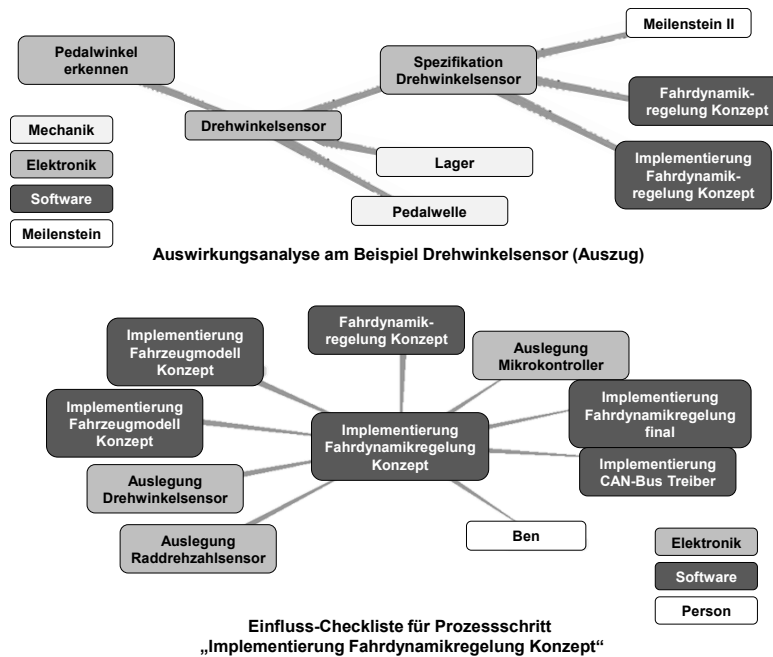


Bild 5-24: Analyse und Visualisierung von Wirkzusammenhängen und Änderungsauswirkungen

Im unteren Teil von Bild 5-24 ist beispielhaft die Einfluss-Checkliste für den Prozessschritt „Implementierung Fahrdynamikregelung Konzept“ dargestellt. Es soll damit gezeigt werden, dass die Methoden in sämtlichen Domänen des integrierten Produkt- und Prozessmodells verwendet werden können. Aus der Darstellung ist ebenfalls ersichtlich, dass die Auslegung des Drehwinkelsensors bei der Erstellung der Fahrdynamikregelung berücksichtigt werden muss.

Prinzipiell können auch weitere Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements zur entwicklungsbegleitenden Analyse angewandt werden. Eine spezielle Anwendung der Einflussanalyse ist das „**Mine Seeking**“ [MAURER 2007, S.136]. Mit dieser Methode können kritische Elemente in der Struktur erkannt werden, die beispielsweise eine Vielzahl von Änderungen nach sich ziehen oder Verbindungen zu anderen Teilen der Struktur herstellen. Diese Informationen können zu Beginn der Entwicklung dazu verwendet werden, potentielle Elemente oder Bereiche des Systems zu identifizieren, die umfangreiche Nachfolgeänderungen nach sich ziehen und entsprechend mehr Aufwand zur Vermeidung von Änderungen bzw. in die Entwicklung dieser Elemente zu investieren. Analog trifft dies auf die **strukturelle Pareto-Analyse** [MAURER 2007, S.136] zu. Diese dient zur Identifikation von Elementen die Bestandteile charakteristischer Strukturmerkmale (Cluster, Kreisschlüsse, weitere siehe Anhang 9.3) sind. Die entsprechenden Elemente können für weitere Analysen entsprechend hoch priorisiert werden, da sie häufig einen hohen Einfluss auf die Eigenschaften des Systems besitzen. Die Anwendung beider Methoden bietet ein hohes Potential zur Optimierung der Systemstruktur. Sie wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Als Alternative zu den oben genannten Methoden können Änderungs- und Wirkabhängigkeiten auch direkt über die **Berechnung indirekter Abhängigkeiten** unter Verwendung spezifi-

scher Teilmatrizen identifiziert werden. Dies ist primär innerhalb der Domänen des Produktmodells relevant, da dort die entsprechenden Wirkzusammenhänge des technischen Systems abgebildet sind. So ist beispielsweise aus der physikalischen Funktionsstruktur (vgl. Kap. 3.3.3) zu erkennen, dass die Funktionen „Bremskraft berechnen“ und „Winkelsignal leiten“ direkt miteinander verknüpft sind (siehe Bild Bild 5-25). Der oben beschriebene Einfluss des Drehwinkelsensors bzw. des erzeugten Winkelsignals auf die Fahrdynamikregelung kann somit direkt aus der Struktur abgelesen werden.

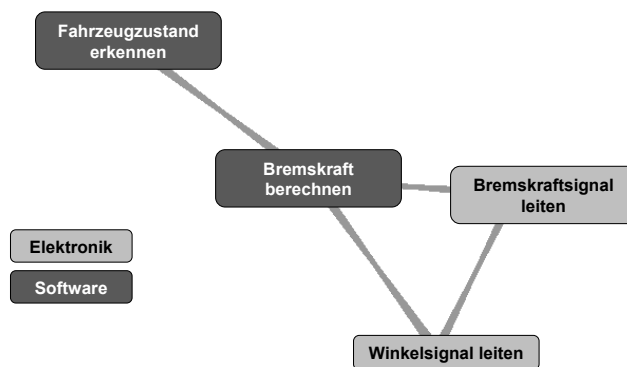


Bild 5-25: Ausschnitt der physikalischen Funktionsstruktur zur Ableitung von Abhängigkeiten

Zur Durchführung detaillierter Analysen und zur Ableitung belastbarer Aussagen sollte ein möglichst vollständiges Systemmodell vorliegen. Dieses kann dabei neben der Produktarchitektur als Eingangsgröße einen geplanten Sollprozess oder einen ablaufenden Ist-Prozess widerspiegeln. Die betrachteten Teilmatrizen müssen dabei nicht zwangsläufig als native Daten aufgenommen werden, sondern können mit Hilfe der Berechnungsmöglichkeiten in Multiple-Domain Matrizen aus anderen Teilmatrizen bzw. Daten abgeleitet werden (siehe Kap. 5.5.5).

Die ersten Erfahrungen aus der Anwendung der Methodik zeigen, dass auch bereits mit einem erheblich reduzierten Systemmodell eine wesentliche Verbesserung in der Praxis erreicht werden kann. Die Verwendung eines Produktmodells erweitert um die Domäne Personen zur Analyse von Änderungsauswirkungen stellt für operative Entwickler bereits eine erhebliche Unterstützung dar (vgl. auch [DIEHL 2009]). Das dadurch erhöhte Systemverständnis kann somit bereits zu einer deutlichen Verbesserung der transdisziplinären Synchronisation führen.

## 5.7.2 Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen

Die zweite entwicklungsbegleitende Maßnahme besteht in der Unterstützung der Kommunikation durch Identifikation geeigneter Team- bzw. Kommunikationsstrukturen sowie relevanten Abstimmungsinhalten. Zur Erstellung von Teamzusammensetzungen sowie Kommunikationsstrukturen werden die **Relationen innerhalb der Domäne Personen** betrachtet. Da diese in der Regel nicht im Voraus bekannt sind, werden dazu indirekte Abhängigkeiten aus der kombinierten Betrachtung unterschiedlicher Teilstrukturen abgeleitet (siehe Kap. 5.5.5).

Die Notwendigkeit von Kommunikation kann beispielsweise aufgrund gemeinsam bearbeiteter Funktionen bzw. Komponenten, Schnittstellen zwischen Funktionen und Komponenten sowie Schnittstellen zwischen Arbeitspaketen (Austausch von Prozessergebnissen) auftreten. Es können theoretisch sämtliche Möglichkeiten zur Ableitung indirekter Abhängigkeiten in der Domäne Personen verwendet werden. Hier wird die Ableitung von **Kommunikationsstrukturen auf Basis von Funktions-, Wirk- sowie Prozessschrittstruktur** dargestellt. Da gerichtete Informationsflüsse identifiziert werden sollen, wird als Eingangsstruktur immer die jeweilige DSM in Kombination mit der entsprechenden DMM zur Abbildung auf die Domäne Personen betrachtet.

Ein empirischer Nachweis, dass die aus der Produktstruktur abgeleiteten Kommunikationsstrukturen die erforderliche Kommunikation sowie die tatsächlich durchgeführten Abstimmungen sehr gut widerspiegeln wird auch bei [BIEDERMANN & LINDEMANN 2011] gezeigt. Die Logik zur Ableitung auf Basis der genannten Produkt- bzw. Prozessstrukturen ist in Bild 5-26 dargestellt.

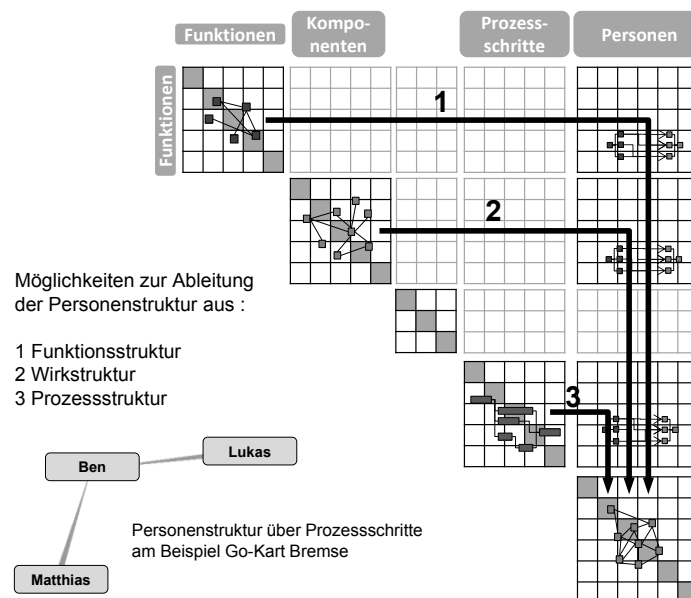


Bild 5-26: Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen

Aus der dargestellten Entwicklerstruktur (Bild 5-26 links unten) auf Grundlage der Prozessschritte kann abgelesen werden, wie die Kommunikationsflüsse in der Entwicklung der Go-Kart Bremse zu gestalten sind. In diesem Fall nimmt Entwickler Ben, der für das Steuergerät und die Fahrdynamikregelung zuständig ist, eine zentrale Stellung ein, da ihm Informationen von beiden anderen Entwicklern zufließen müssen. Aus der Wirkstruktur wird deutlich, dass diese jeweils nur Schnittstellen über den CAN-Bus besitzen. So verantwortet Lukas die Entwicklung des Bremsmoduls und muss die Spezifikation der Leistungselektronik bzw. des Linearstellzylinders kommunizieren. Der Entwickler Matthias hat den Drehwinkelsensor als Schnittstelle und muss die Daten über die gesendeten Winkelbereiche weitergeben.

Für die Teamzusammensetzung bedeutet dies, dass Ben in sämtliche Besprechungen bzw. Informationsflüsse (Änderungen, Produktkonkretisierung) eingebunden werden muss, da alle Informationen bei ihm zusammenfließen. Hingegen ist eine exklusive Kommunikation zwischen Matthias und Lukas nicht erforderlich. Sie besitzen klar definierte Systemgrenzen für ihre Teilentwicklungen und Entscheidungen bzw. Änderungen betreffen weder Komponenten noch Funktionen des jeweils anderen.

Eine weitere Anwendung zur Erstellung von **phasenbezogenen Teamstrukturen** mit Ausrichtung auf das Lean Development wird in [ELEZI et al. 2011] gezeigt. Auch in diesem Fall werden die Teamstrukturen aus der DSM der Prozessschritte sowie der Verknüpfung Prozessschritte – Entwicklungsabteilungen berechnet. Im Gegensatz zur oben gezeigten Anwendung wird nicht der gesamte Entwicklungsprozess als Berechnungsgrundlage verwendet, sondern jeweils die einzelnen Phasen (Zeiträume zwischen Meilensteinen). Es könnten somit phasenspezifische Abhängigkeiten zwischen den Abteilungen identifiziert werden. Durch Clustern der berechneten Matrizen können so Team- bzw. Besprechungszusammensetzungen identifiziert werden.

Eine weitere Unterstützungsmaßnahme betrifft die **Identifikation von relevanten Abstimmungsinhalten** zur Unterstützung einer zielgerichteten Gestaltung der Kommunikation. Dazu werden ebenfalls die in den einzelnen Prozessphasen zu bearbeitenden Entwicklungsumfänge identifiziert sowie die damit verbundenen Personen identifiziert. Die Betrachtung der Entwicklungsumfänge kann dabei aus Funktions- sowie Komponentenperspektive erfolgen. Die hierfür relevanten Teilmatrizen mit der Abbildung von Funktionen bzw. Komponenten auf Personen und Meilensteine befinden sich oben rechts im integrierten Systemmodell (siehe Bild 5-17). Die in diesen Teilmatrizen abgebildeten Informationen sind in der Regel nicht nativ verfügbar, jedoch können sie mit den vorhandenen Berechnungsmöglichkeiten abgeleitet werden (siehe hierzu auch [MAURER & BRAUN 2008]).

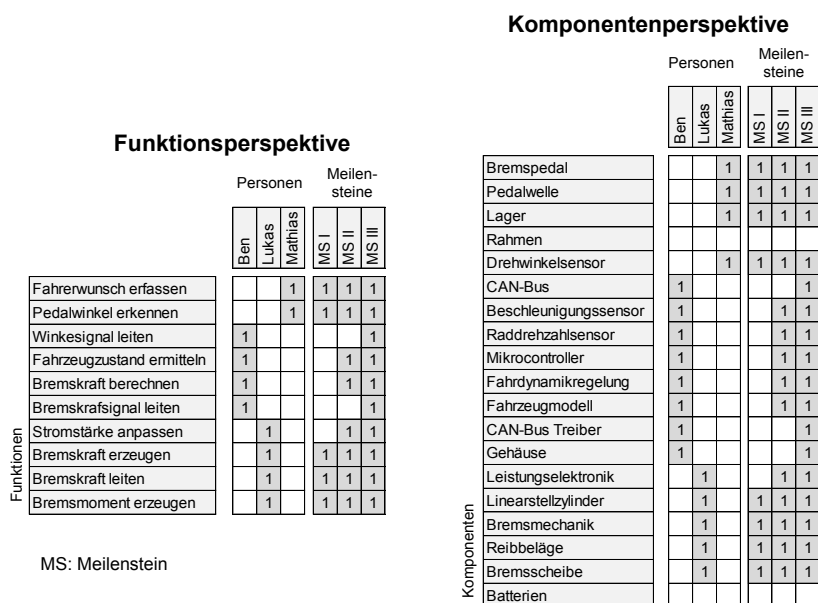


Bild 5-27: Identifikation von Abstimmungsinhalten in unterschiedlichen Entwicklungsphasen

In Bild 5-27 sind die entsprechend berechneten Matrizen für die Go-Kart Bremse dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass nicht alle Funktionen bzw. Komponenten in allen Prozessphasen betrachtet werden müssen. So sind die Funktionen „Bremskraft berechnen“ oder „Fahrzeugzustand ermitteln“ erst in der Phase vor Meilenstein II (Phase II), die Funktionen „Winkelsignal leiten“ und „Bremskraftsignal leiten“ erst in Phase III betroffen. Aus Komponentensicht sind beispielsweise die Leistungselektronik sowie der Mikrocontroller in Phase II, der CAN-Bus sowie der CAN-Bus Treiber erst in Phase III relevant. Zusätzlich können die jeweils verantwortlichen Entwickler identifiziert werden, um einen zielgerichteten Informationsfluss zu unterstützen.

## 5.8 Prozesssteuerung und -kontrolle

Ein weiterer Schwerpunkt des entwickelten Ansatzes liegt in der Unterstützung der Prozesssteuerung und -kontrolle und gehört damit ebenfalls zum **deskriptiven Anteil** der Methodik. Eine wesentliche Aufgabe der Prozesssteuerung (Controlling) ist die kontinuierliche Erfassung des Projektstatus (Reifegrad) sowie des Projektfortschrittes um daraus den aktuellen Grad der Zielabweichung zu ermitteln (siehe Kap. 3.4.1). Aus diesem können geeignete Maßnahmen zur Korrektur der festgestellten Zielabweichung abgeleitet werden. Es können nach WIBLER input-, ablauf- und ergebnisorientierte Verfahren unterschieden werden. Input und ablauforientierte Verfahren (z. B. Meilenstein-Trendanalyse, Faktorverbrauch) basieren dabei auf einem Soll-Ist Vergleich von Ablauf- und Kapazitätsplänen, während ergebnisorientierte Ansätze einen Vergleich bezüglich spezifischer Indikatoren (z. B. freigegebene Zeichnungen, fertig gestellte Arbeitspakete) vornehmen [WIBLER 2006, S.41].

Die effiziente und effektive Steuerung des Entwicklungsprozesses mechatronischer Produkte erfordert somit neben dem integrierten Modell des sozio-technischen Systems und der enthaltenen Analysemöglichkeiten weiterhin ein geeignetes **Reifegradmodell zur Abbildung des Entwicklungsstandes**, welches sowohl in der Planung sowie entwicklungsbegleitend zur Steuerung und Kontrolle verwendet wird. Der aktuelle Entwicklungsstand des Produktes wird in den aktuellen Ansätzen meist mit Hilfe von spezifischen Reifegradsystemen ermittelt und modelliert, die spezifische Indikatoren als Eingangsgrößen verwenden und diese in Form einer oder mehrerer aggregierter Kennzahlen ausdrücken (siehe Kap. 3.4.1). Hierbei kann grundsätzlich die Reife des technischen Systems (*Produktreife*) sowie des Entwicklungsprozesses (*Prozessreife*) betrachtet werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Unterstützung des Prozesses durch die Bereitstellung spezifischer Methoden und Hilfsmittel angestrebt. Hierunter fällt die Modellierung und Darstellung der *Reife des technischen Produktes* zur Steuerung des Prozesses. Die Beurteilung des Entwicklungsprozesses selbst ist nicht Gegenstand der Unterstützung, weshalb im Folgenden ausschließlich die Reife des technischen Produktes betrachtet wird.

Es werden zunächst grundlegende Betrachtungen zu Reifegradsystemen in der Mechatronik dargestellt, in dem spezifische Herausforderungen für den betrachteten Anwendungsfall aufgezeigt sowie Anforderungen abgeleitet werden. Im Anschluss erfolgt die Darstellung eines Konzeptes für ein funktionsorientiertes System zur Reifebestimmung, in dem die vielfältigen Abhängigkeiten in der Produktarchitektur besonders berücksichtigt werden. Auf dieser Grundlage wird gezeigt, dass die Entwicklung eines neuartigen mechatronischen Reifegrad-



systems, analog zu vereinheitlichten mechatronischen Entwicklungsprozessen, im hier betrachteten Kontext nicht notwendig bzw. zielführend ist. Im Anschluss wird in 5.8.2 das dieser Arbeit zugrunde gelegte Verständnis von Reifegraden, das sich an bestehenden Ansätzen orientiert, erläutert, sowie die Möglichkeiten zur Darstellung und Analyse von unterschiedlichen Produktreifegraden im integrierten Produkt- und Prozessmodell aufgezeigt.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Themengebiet der Erfassung und Modellierung von Produktreifegraden ein umfassendes, eigenständiges Forschungsgebiet darstellt. Es ist jedoch eng mit der Prozesssteuerung vernetzt, die bei der Entwicklung einer Methodik zur Prozessunterstützung mitbetrachtet werden muss. Die Planung von Prozessen erfordert neben der strukturellen und zeitlichen Dimension auch die Festlegung und Überwachung des Entwicklungsfortschrittes. Es wurden daher im Rahmen dieser Arbeit grundsätzliche Betrachtungen durchgeführt. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse können bei einer detaillierteren Bearbeitung der Thematik herangezogen werden.

### 5.8.1 Betrachtungen zu Reifegraden mechatronischer Produkte

Aus Sicht einer einfachen Prozessplanung und -steuerung besteht die Zielsetzung in der Entwicklung eines **Reifegradsystems**, in dem der Entwicklungsstand sowohl des Gesamtsystems wie auch in den einzelnen Disziplinen erkennbar und interpretierbar ist. Dabei sollen objektive und einfach erfassbare Reifegradindikatoren (siehe Kap. 3.4.1) verwendet werden. Diese sollen den aktuellen Entwicklungsfortschritt in Form einer oder mehrerer aggregierter Kennzahlen ausdrücken. Dabei müssen die Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Disziplinen innerhalb des Produktes sowie im Prozess berücksichtigt werden. Somit besteht auch die Möglichkeit in der Planung, Sollvorgaben zu erstellen in denen die Zustände der verwendeten Indikatoren über dem zeitlichen Verlauf vorgegeben werden.

Aus Perspektive von Verantwortlichen ist dabei eine möglichst geringe Anzahl an Kennzahlen anzustreben. Gleichzeitig müssen die Reifegradbetrachtungen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen unterstützt werden, um operativ tätigen Entwicklern detaillierte Aussagen über den Entwicklungsstand zu gestatten sowie die Interpretation der Kennzahlen zu ermöglichen. Dies ist vor allem mit Hinblick auf die Unterstützung von Entscheidungen bei Abweichungen vom vorgegebenen Verlauf erforderlich.

Zu Beginn wurde daher eine Analyse der aktuell in der Forschung und Industrie verwendeten Reifegradsysteme durchgeführt. Dabei wurden die Bereiche *Technologiereifegrade*, *Prozessreifegrade* sowie *Produktreifegrade* auf ihre Eigenschaften und Übertragbarkeit auf mechatronische Systeme hin analysiert [PRODUKTENTWICKLUNG 2011e, S.19]. Die Ergebnisse der Betrachtungen zu vorhandenen Ansätzen sowie Reifegradsystemen zeigt, dass ein sehr differenziertes Verständnis von Produktreife mit unterschiedlichen Bewertungs- und Darstellungssystemen vorhanden ist. Dies zeigt sich sowohl zwischen den Disziplinen sowie vor allem über die Disziplingrenzen hinweg. Es existieren ebenfalls Ansätze, die diese unterschiedlichen Reifegradsysteme in ein gemeinsames System einordnen und somit ineinander überführbar zu gestalten. Die Analyse zeigt jedoch, dass ein **disziplin- und bereichsübergreifendes Verständnis häufig nicht erreicht** werden kann.

Insbesondere für die transdisziplinäre Entwicklung mechatronischer Produkte ist daher ein domänenübergreifendes Reifegradsystem anzustreben, in dem der aktuelle Stand der Entwicklung im Gesamtsystem sowie in den drei Disziplinen abgebildet wird. Dabei haben sich folgende zentrale **Herausforderungen** bei der Erstellung eines Reifegradsystems für mechatronische Produkte identifiziert:

- Unterschiedliche Begriffswelten und Systemverständnis in den Disziplinen
- Heterogenität und Diversität der verwendeten Reifegradindikatoren
- Heterogene Tool- und Datenlandschaft
- Hohe Anzahl und Verschiedenartigkeit der Abhängigkeiten im Produkt
- Transparente, domänenübergreifende Visualisierung
- Interpretation der Reifegrade, vor allem Ableitung zeitlicher Aussagen
- Zeitlicher Versatz zwischen Funktionsprüfung und Rücktransfer in den Prozess

Während die ersten Punkte selbsterklärend sind und die grundlegenden Herausforderungen in der Mechatronik widerspiegeln, soll auf die letzten beiden Punkte detailliert eingegangen werden. Die Analyse der Reifegradsysteme sowie Expertengespräche in der Industrie haben gezeigt, dass die Verantwortlichen und Entwickler Probleme bei der Interpretation der berechneten Kennzahlen haben. Aus Sicht von Verantwortlichen ist primär interessant, wie die Abweichung der Kennzahlen vom Sollzustand zu interpretieren ist und welche Konsequenzen sich daraus ergeben. Daraus können Rückschlüsse über den notwendigen Aufwand (primär Zeit, auch Kapazität) gezogen werden, die als Grundlage für Entscheidungen dienen. Der zweite Punkt betrifft die Zeitspanne, die vergeht bis ein funktionsüberprüfender Test durchgeführt wurde und sich dessen Ergebnis im Entwicklungsstand widerspiegelt. Da die Entwicklung in dieser Zeit in der Regel weiterläuft, wurde zwischenzeitlich ein neuer Entwicklungsstand erreicht der nicht mit dem überprüften übereinstimmt. Daraus ergibt sich die Problemstellung, wie mit dieser möglichen Diskrepanz umgegangen werden kann und wie sich der Reifegradverlauf entsprechend verändert.

Auf dieser Basis dieser Analysen wurden Anforderungen an ein Reifegradsystem für mechatronische Produkte abgeleitet, die in Kap. 4.2 dargestellt sind. Im Anschluss wurde darauf aufbauend ein **Konzept für die Erfassung, Modellierung und Darstellung von Reifegraden** für mechatronische Produkte erstellt. Es greift den Grundgedanken der Funktionsorientierung auf, der sich in der Mechatronikentwicklung allgemein sowie im entwickelten Ansatz zur Prozessplanung als zielführend erwiesen hat. Weiterhin wurde ein Fokus auf die zahlreichen Abhängigkeiten im System sowie das notwendige Zusammenwirken unterschiedlicher Komponenten und Funktionen betrachtet.

Das entwickelte Konzept betrachtet auf unterster Ebene zunächst die technische Konkretisierung sowie das Zusammenwirken verschiedener Komponenten in der Wirkstruktur. Diese bilden die Basis für die verschiedenen Funktionen des Produktes sowie deren Zusammenwirken (Vernetzung) in komplexeren Funktionen (vgl. Kap. 5.3 & 5.5.2) in der Funktionsstruktur. Das Zusammenwirken von Funktionen einer Abstraktionsebene kann ebenfalls über die Be-

trachtung von Zuständen<sup>55</sup> des Systems vorgenommen werden. Die Systemzustände zu bestimmten Zeitpunkten sowie deren Übergänge werden häufig im Rahmen von Tests zur Überprüfung von Funktionen verwendet. Auf höchster Abstraktionsebene wird schließlich das hierarchische Zusammenwirken der verschiedenen Teilfunktionen zu Systemfunktionen betrachtet. Aus der Kombination von Systemfunktionen, Umfeld und Zuständen lässt sich ein Gesamtproduktreifegrad bestimmen. Eine grafische Darstellung des Reifegradkonzeptes zeigt Bild 5-28.

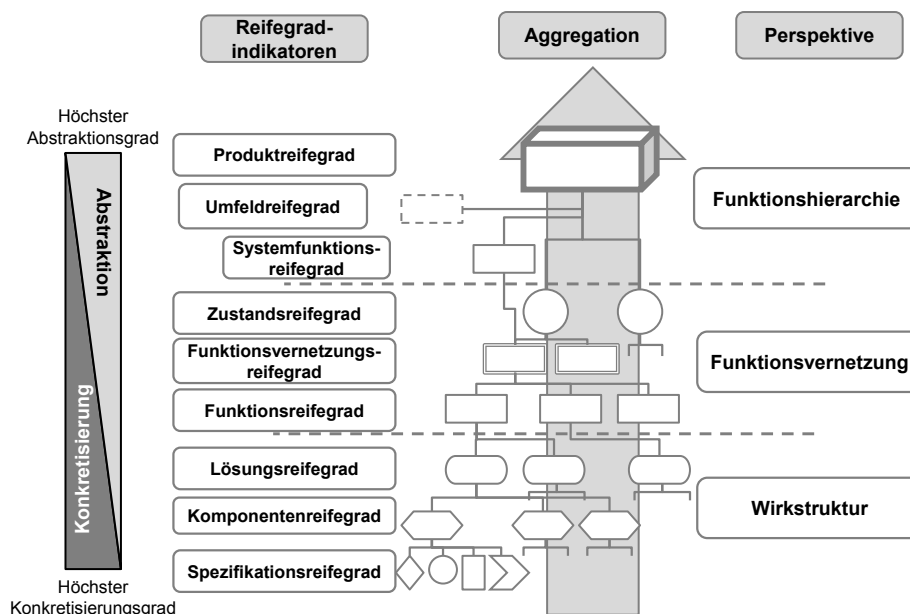


Bild 5-28: Hierarchisches Reifegradmodell für mechatronischen Produkte (schematisch)  
[in Anlehnung an *PRODUKTENTWICKLUNG 2011e*, S.87]

Mit dem entwickelten Konzept lassen sich Reifegrade auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen modellieren und darstellen. Das Vorgehen zur Bestimmung der Produktreife erfolgt Bottom-Up, ausgehend von der Vollständigkeit der Spezifikation der einzelnen Komponenten. Die unterschiedlichen Reifegradindikatoren (Bild 5-28 links) beschreiben somit den aktuellen Entwicklungsstand des Produktes in Bezug auf einem spezifischen Abstraktionslevel. Dabei spiegeln sie gleichzeitig eine bestimmte Perspektive, wie Wirkstruktur, vertikale Funktionsvernetzung sowie horizontale Funktionsvernetzung, auf das Gesamtsystem wieder (Bild 5-28 rechts). Der Zustandsreifegrad gibt beispielsweise darüber Auskunft, ob die Zustände des Systems, die aus dem Zusammenwirken unterschiedlicher Funktionen bzw. Funktionsgruppen resultieren, den definierten Anforderungen entsprechen.

<sup>55</sup> Die Betrachtung von Zuständen spiegelt die Perspektive der Regelungstechnik wieder. Ein Zustand ist eine eindeutige Momentaufnahme eines System und kann über Menge von Eigenschaften (den Zustandsgrößen) beschrieben werden [vgl. FLATH 2002, S.25]. Die Funktionen des technischen Produktes werden in diesem Kontext als Übergang zwischen zwei Zuständen interpretiert [FLATH 2002, S.47].

Es wurde mathematische Beziehungen zur Berechnung von Kennzahlen für die einzelnen Produktreifegrade definiert. In diese fließen jeweils die darunter liegenden (geringerer Abstraktionsgrad) Reifegradindikatoren ein. Außerdem wurde berücksichtigt, dass die Abhängigkeiten zwischen Komponenten bzw. Funktionen quantitativ bewertet werden und ebenfalls in die Berechnung einfließen. Der entwickelte Ansatz gestattet somit die Modellierung und Berechnung von quantitativen Produktreifegraden (Kennzahlen) für mechatronische Produkte unter Berücksichtigung von domäneninternen und domänenübergreifenden Abhängigkeiten. Darüber hinaus wurden bei der Konzipierung des Reifegradsystems die grafische die Visualisierung und Verfolgung der Reifegrade betrachtet [PRODUKTENTWICKLUNG 2011e].

Mit diesem Konzept kann die *Vielschichtigkeit und Komplexität* der zu berücksichtigenden Aspekte bei der Betrachtung von Reifegraden in mechatronischen Produkten gezeigt werden. Auf die konkrete Ausgestaltung der mathematischen Berechnungsvorschriften sowie der Modellierung und Visualisierung der Reifegrade wird nicht im Detail eingegangen, da sie im Folgenden nicht benötigt werden.

Die Konzeptionierung eines eigenen Ansatzes eines Produktreifegradsystems sowie die Ergebnisse einer beispielhaften Anwendung [PRODUKTENTWICKLUNG 2011e] haben gezeigt, dass bei der Erfassung und Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes in mechatronischen Produkten eine Vielzahl unterschiedlicher Aspekte berücksichtigt werden müssen. Die reine **Erfassung von Entwicklungsständen einzelner Komponenten oder auch Funktionen ist nicht ausreichend**, da die Eigenschaften des Gesamtsystems wesentlich durch deren Zusammenwirken charakterisiert werden (vgl. Kap. 2.2). Die vollständigen **Abbildung der Abhängigkeiten** sowie der unterschiedlichen Perspektiven führt wiederum zu einer **hohen Komplexität des Reifegradsystems**, die *für den Anwender nicht mehr zu überblicken* ist. Es lässt sich festhalten, dass die Zielsetzung der Berücksichtigung unterschiedlicher Perspektiven sowie der Abhängigkeiten in der Produktarchitektur grundsätzlich erreicht werden konnte. Das Konzept ist in sich geschlossen und ermöglicht die Berechnung von Reifegraden auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen sowie über alle Disziplinen hinweg.

Gleichzeitig ist das entstandene Reifegradsystem **zu komplex**, um eine einfache und schnelle Interpretation zu ermöglichen. Zum einen müssen verschiedene Reifegrade in Kombination betrachtet werden, zum anderen kann die **Entstehung einzelner Kennwerte kaum nachvollzogen** werden. Somit wurde die Zielsetzung der *einfachen Verständlichkeit und Interpretation* nicht erreicht. Eine einfache Ableitung **zeitlicher Aussagen** zur Unterstützung der Entscheidungsfindung ist in Folge ebenfalls **nur eingeschränkt vorhanden**. Ein letzter Punkt ist der **hohe Aufwand** zur Erfassung und Bewertung sämtlicher Abhängigkeiten. Hierbei kann zwar auf das entwickelte Systemmodell zurückgegriffen werden, jedoch ist zur Erzielung aussagekräftiger Ergebnisse eine detaillierte Bewertung erforderlich.

Zusammenfassend lässt sich aus den durchgeführten Betrachtungen festhalten, dass **die vollständige Erfassung und Modellierung von hierarchischen Reifegraden in hochvernetzten Produkten nicht zielführend** ist. Es wurde grundsätzlich gezeigt, dass Reifegrade domänenübergreifend auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen für Elemente und deren Vernetzung erfasst und modelliert werden können. Die dabei gewonnen Aussagen sind jedoch für die Unterstützung der Entwicklung **nur sehr eingeschränkt hilfreich**. Die zu berücksichtigenden Faktoren sowie die erforderlichen Eingangsinformation sind deutlich zu umfangreich. Daraus

ergibt sich eine **hohe Komplexität des Reifegradsystems** und eine **geringe Nachvollziehbarkeit** über das Zustandekommen der berechneten Kennzahlen, was zu Schwierigkeiten bei der Interpretation führt. Ein weiterer Punkt ist die *Bewertung des Erfüllungsgrades* für Anforderungen und Relationen, wobei nicht vollständig auf objektive Kriterien zurückgegriffen werden kann. Die quantitativen Kennzahlen *vermitteln somit eine falsche Sicherheit* für den Anwender. Zudem können sich die relevanten Anforderungen und Zielfunktionen durch die im Verlauf der Entwicklung durch die zunehmende Konkretisierung, geänderte Randbedingungen sowie Entscheidungen dynamisch verändern (siehe Kap. 3.4.1). Dies führt zu Zyklen im Entwicklungsprozess in Form von Nacharbeit bzw. Verfeinerung der Elemente, die zunächst ein Absinken des Reifegrades bewirken würden. Dies schränkt die Aussagekraft der Kennzahlen zu einem bestimmten Zeitpunkt weiter ein. Der *Mehrwert der generierten Informationen ist somit gegenüber bestehenden, einfacheren Ansätzen nur sehr begrenzt* gegeben.

Aus den oben dargelegten Gründen wurde die **Entwicklung und Implementierung eines neuartigen Reifegradsystems** für mechatronische Produkte im Rahmen dieser Arbeit **nicht durchgeführt**. Es wurde statt dessen ein Verständnis von Reifegraden verwendet, das sich an bestehenden Ansätzen orientiert (vgl. Kap. 3.4.1). Weithin bietet auch das entwickelte Systemmodell Möglichkeiten, verschiedene zur Prozesssteuerung einsetzbare Reifegrade in Form von Kennzahlen abzuleiten.

### 5.8.2 Modellierung und Bewertung des Entwicklungsfortschrittes

Im vorherigen Teilkapitel wurden grundsätzliche Betrachtungen zu Reifegraden von mechatronischen Produkten durchgeführt sowie Anforderungen (siehe Kap. 4.2) aufgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Entwicklung eines neuartigen Reifegradsystems auf Basis des entwickelten Systemverständnisses im hier betrachteten Kontext nicht zielführend ist. Für die Steuerung des Prozesses ist dennoch die Erfassung und Modellierung des Entwicklungsfortschrittes notwendig. Ebenso soll die domänenübergreifende Kommunikation über den aktuellen Stand der Entwicklung unterstützt werden, die einen wesentlichen Beitrag zur Synchronisation leistet (vgl. Kap. 5.7). Da sich die vollständige Erfassung und Bewertung von Komponenten und Abhängigkeiten als nicht zweckmäßig herausgestellt hat, werden im Folgenden unterschiedliche Ansätze zur Interpretation des Reifegrades sowie zur Ableitung von Kennzahlen aus dem integrierten Systemmodell dargestellt (siehe [HELLENBRAND & LINDEMANN 2011]). Diese Kennzahlen können auch in ein bestehendes Controlling übernommen werden.

Ein Ansatz ist die **Verwendung der Prozessergebnisse** zur Definition des Produktreifegrades. Diese sind eng verknüpft mit den Komponenten des mechatronischen Produktes, da sie jeweils deren spezifische Ausprägungen zu bestimmten Zeitpunkten im Prozess darstellen [siehe z. B. HERBERG et al. 2010]. Sie können somit zur Beschreibung des aktuellen Entwicklungsstandes der Komponenten herangezogen werden. Der aktuelle Entwicklungsfortschritt wird somit über die Ausprägung der jeweils relevanten Prozessergebnisse (Existenz und Qualität) zu bestimmten Zeitpunkten oder Phasen im Prozess abgebildet (d. h. wann ist welches Entwicklungsobjekt in welchem Zustand vorhanden?). Der Produktreifegrad wird bei diesem Ansatz mit Begriffen wie Anforderungsliste, Simulationsmodell oder physischer Prototyp mit spezifischen Eigenschaften beschrieben. Neben der Verwendung des Freigabestatus der Mo-

delle ist für eine detaillierte Modellierung des Reifegrades zusätzlich die eine Beschreibung der Ausprägung der Prozessergebnisse (Qualität der Modelle) erforderlich.

Diese Form der Reifegraddarstellung ist sehr gut zur **Unterstützung der Kommunikation** zwischen den Disziplinen geeignet. Durch die einfache Beschreibung der Ausprägungen der Prozessergebnisse ist sie allgemein verständlich und trägt so zur **Bildung einer gemeinsamen Zielvorstellung** bei. Die Existenz bzw. Ausprägung der Prozessergebnisse ist außerdem eng mit den Meilensteinen bzw. der betrachteten Phase im Prozess verknüpft, da die Inhalte der Meilensteine über die zu erbringenden Prozessergebnisse definiert werden (siehe Kap. 5.6). Die Meilensteine definieren damit das Erreichen einer bestimmten Produktreife. Die einzelnen Disziplinen können somit nachvollziehen, wie sich der Entwicklungsstand in den anderen Disziplinen in der jeweiligen Phase verändert und ihre eigene Entwicklung entsprechend darauf abstimmen. Weiterhin können auch Anforderungen an die zu erstellenden Prozessergebnisse (Quantifizierung der Ausprägungen) aufgestellt werden. Über deren Erfüllungsgrad kann so eine quantitative Aussage über den Entwicklungsfortschritt in der betrachteten Phase getroffen werden. Die Problematik der Veränderung des Reifegrades durch Verfeinerung oder Nacharbeit (siehe Kap. 5.8.1) wird dabei abgemildert, da die Beschreibung der Prozessergebnisse keine vollständige Kenntnis der Produktspezifikation erfordert. Diese stellen jeweils nur bestimmte Aspekte des Endproduktes dar, zudem kann eine phasenweise Anpassung und Konkretisierung erfolgen.

Ein weiterer Ansatz ist, die **Funktionen** des mechatronischen Produktes **zur Beschreibung der Produktreife** zu verwenden. Auf Basis der Funktionshierarchie können die jeweils zu realisierenden Funktionen (technische Funktionen, Teilfunktionen, Systemfunktionen, Kundenfunktionen, siehe Kap. 5.5.2) als Reifestufen verwendet werden. In der funktionsorientierten Prozessplanung werden die Inhalte der Meilensteine über die abzuprüfenden Funktionen definiert (siehe Kap. 5.6). Die Ebenen der Funktionshierarchie sind somit, analog zu den Prozessergebnissen, mit spezifischen Phasen im Prozess sowie den diese abschließenden Meilensteinen verknüpft. Im Gegensatz zum oben dargestellten komponentenorientierten Ansatz wird bei diesem Verständnis von Reifegraden die funktionsorientierte Sichtweise konsequent aufgegriffen. Dieser Ansatz ist dadurch besser geeignet für die Entwicklung mechatronischer Produkte, da die Erfüllung von Funktionen das Zusammenwirken unterschiedlicher Domänen erfordert und somit der transdisziplinäre Charakter der Entwicklung repräsentiert wird. Die zur Beschreibung der Reifegrade erforderlichen Informationen werden während der Prozessplanung bereits generiert und müssen somit nicht separat erzeugt werden. Die oben genannten Vorteile einer verbesserten Kommunikation sowie der Anpassung der eigenen Entwicklungsumfänge an die anderen Disziplinen ist auch in diesem Fall gegeben.

Die *Nachteile an beiden Ansätzen* zur Modellierung des Entwicklungsfortschritts liegen aus Sicht des Controllings in der Abbildung der Reifegrade. In beiden Fällen ist die textuelle Beschreibung der spezifischen Ausprägungen von Funktionen bzw. Komponenten erforderlich. Für beteiligte Entwickler ist diese Form aufgrund des vorhandenen Fachwissens einfach verständlich und fördert die Kommunikation sowie gemeinsame Zielvorstellungen. Für nicht direkt an der Entwicklung Beteiligte (z. B. Projektverantwortliche) erfordert die Interpretation jedoch unter Umständen einen hohen Aufwand bzw. ist nicht durchführbar. Es werden stattdessen aufgabenunabhängige Kennzahlen benötigt, die eine einfache Interpretation sowie eine

Vergleichbarkeit von Projekten ermöglichen. Diese können direkt für das Controlling sowie zur unternehmensweiten Kommunikation verwendet werden. Hierfür kann das integrierte Produkt- und Prozessmodell verwendet werden, aus dem in einem ergebnisorientierten Ansatz der **Entwicklungsfortschritt in Bezug auf Funktionen, Prozessergebnisse sowie Prozessschritte** über quantitative Werte ausgedrückt werden kann (siehe Bild 5-29).

Wie zu Beginn des Kapitels dargestellt, wird in ergebnisorientierten Ansätzen der Entwicklungsfortschritt durch einen Soll/Ist-Vergleich bezüglich bestimmter Indikatoren ausgedrückt. Im integrierten Produkt- und Prozessmodell kann der strukturelle Fortschritt über das Produktmodell ausgerückt werden, während aus dem Prozessmodell sowohl strukturelle Aussagen wie aus Erkenntnisse über den zeitlichen Fortschritt abgeleitet werden können [HELLENBRAND & LINDEMANN 2011; BRAUN et al. 2007a].

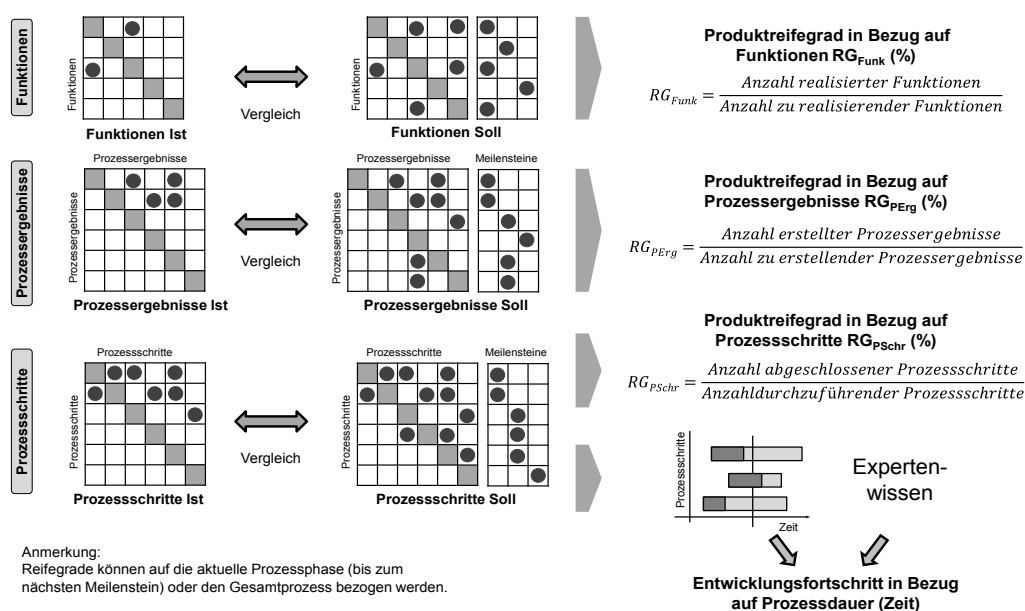


Bild 5-29: Darstellung von Reifegraden im integrierten Produkt- und Prozessmodell

Zur Beschreibung des **strukturellen Produktfortschrittes** können als Indikatoren die **Funktionen** sowie die **Prozessergebnisse** verwendet werden (Bild 5-29). Aus dem Vergleich der zu einem spezifischen Zeitpunkt realisierten Funktionen mit den zu diesem Zeitpunkt geplanten Funktionen kann ein prozentualer Entwicklungsfortschritt berechnet werden (analog Prozessergebnisse). Die Prozessergebnisse werden in dieser Sichtweise zum Produktmodell gezählt, da sie spezifische Repräsentationen der Komponenten darstellen. Sie liefern somit eine detailliertere Aussage über den Entwicklungsstand als die direkte Betrachtung der Komponenten, die daher auch nicht als Indikator verwendet werden kann. Aus der aggregierten Betrachtung der mit einer spezifischen Komponente verknüpften Prozessergebnisse kann deren Entwicklungsstand abgelesen werden. Es ergeben sich somit ein Funktions- sowie ein Komponentenreifegrad zur Abbildung des Entwicklungsstandes des technischen Systems.

Die Festlegung der Soll-Werte kann bezüglich beider Indikatoren sowohl in **Bezug auf den nächsten Meilenstein** (aktuelle Prozessphase) sowie auf den **Gesamtprozess** bezogen wer-

den. Im ersten Fall steigt der Reifegrad zwischen den Meilensteinen auf 100% an und beginnt in der nächsten Phase wieder bei 0%. Im zweiten Fall ergibt sich ein kontinuierlicher Verlauf über den gesamten Entwicklungsprozess. Die Verwendung der aktuellen Phase bietet den Vorteil, dass bei Erreichen der Meilensteine in Abhängigkeit des bisherigen Entwicklungsverlaufs die Sollvorgaben situationsspezifisch angepasst werden können. Die Berechnung der Reifegrad kann auch separat für jede Disziplin durchgeführt werden, indem die Prozessergebnisse entsprechend den Verknüpften Komponenten getrennt dargestellt werden. Die Visualisierung und Verfolgung der Produktreife kann neben Verlaufsdiagrammen beispielsweise auch über Spinnen- oder Balkendiagramme erfolgen, die eine gleichzeitige Darstellung der Disziplinen sowie der Soll- und Ist-Werte erlauben.

Die **Nachteile** dieser Produktreifegrade sind, dass sie nicht sämtliche Aspekte (wie Vernetzung) erfassen und somit nur eine begrenzte Aussage über den tatsächlichen Entwicklungsstand treffen (vgl. Kap. 5.8.1). Weiterhin wird lediglich die Existenz der geforderten Prozessergebnisse erfasst, deren Qualität (Genügen die Komponenten den Anforderungen?) wird nicht betrachtet.

Die Berechnung des Produktreifegrades in Bezug auf Funktionen bzw. Prozessergebnisse kann auch mit dem weiter oben dargestellten Verständnis von Reifegradstufen kombiniert werden. So können Kennzahlen für sämtliche Arten von Prozessergebnissen (Funktionsmodelle, Simulationsmodell, Prototypen, usw.) berechnet werden. Dies kann phasenbezogen oder über den Gesamtprozess geschehen. Analog dazu können die Erfüllungsgrade für Funktionen auf den spezifizierten Ebenen in der Funktionshierarchie berechnet werden.

Wie oben dargestellt, besitzen die strukturellen Reifegrade nur begrenzte Aussagekraft für operative Entwickler und Projektverantwortliche. Es werden daher **zeitliche Aussagen** über den aktuellen Status bzw. die Abweichung vom Zielzustand angestrebt. Der zur Behebung einer Zielabweichung notwendige zeitliche Aufwands hat für die operative Steuerung von Projekten eine erheblich größere Bedeutung, da sie als Grundlage für Entscheidungen in Bezug auf das weitere Vorgehen verwendet werden kann. Diese Aussagen sind zudem domänenübergreifend verständlich, was zu einer Erhöhung der Transparenz führt. Zur Erfassung des zeitlichen Entwicklungsfortschrittes kann als Indikator der **Erfüllungsgrad der Arbeitspakete** (phasenbezogen oder Gesamtprozess) herangezogen werden. Dies geht zunächst nicht über die strukturelle Betrachtung hinaus und besitzt nur begrenzte Aussagekraft.

Aus der qualitativen Analyse der nicht fertiggestellten Prozessschritte sowie der Prozessstruktur können Aussagen über den zu erwartenden **zeitlichen Verzug** abgeleitet werden (vgl. Trendanalysen im Projektmanagement [BURGHARDT 2008, S.366ff]). Die Struktur der Prozessergebnisse ermöglicht dabei die Auswirkungen auf den weiteren Prozessverlauf zu analysieren. Auf dieser Grundlage kann eine Abschätzung des Aufwandes zur Korrektur der Zielabweichung vorgenommen werden sowie eine Neuplanung des Prozesses erfolgen. Die Genauigkeit der getroffenen Aussagen kann durch die Einbindung von Erfahrungs- bzw. Expertenwissen erheblich gesteigert werden.

Zusammenfassend wird festhalten, dass auf Grundlage des integrierten Produkt- und Prozessmodells sehr einfach quantitative Reifegrade berechnet werden können, die direkt zur Steuerung und Kontrolle des Prozesses verwendet werden können. Neben diesen rein strukturellen Betrachtungen ermöglicht es auch die Ableitung zeitlicher Aussagen in Bezug auf die



Korrektur der Zielabweichung. Alternativ können selbstverständlich in einer Implementierung in der Praxis auch andere Reifegradindikatoren (Eigenschaften, freigegebene Bauteile, etc.) im Controlling verwendet werden.

## 5.9 Rechnerunterstützung und Visualisierung des integrierten Modells

Die hohe Komplexität mechatronischer Produkte sowie die Vielzahl der zu berücksichtigenden Abhängigkeiten in Produkt und Prozess erfordern beim Einsatz der entwickelten Methodik eine geeignete Rechnerunterstützung sowie eine verständliche und transparente Visualisierung des integrierten Systemmodells.

Zur rechnerinternen Abbildung und Verarbeitung der enthaltenen (Partial-)Modelle ist der gewählte MDM-basierte Ansatz grundsätzlich sehr gut geeignet, da die Matrizen einfach gespeichert und manipuliert werden können. Diese Darstellungsform des Modells mit Hilfe von Matrizen ist jedoch für ungeübte Anwender nur schwer verständlich und somit ungeeignet für den normalen Entwickler im täglichen Arbeitseinsatz. Daher ist eine allgemein verständliche Unterstützung der Methodik zur transdisziplinären Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse und der damit verbundenen Erstellung und Analyse des Systemmodells durch ein geeignetes Rechnerwerkzeug erforderlich.

Die Rechnerunterstützung sowie die eng damit verknüpfte Visualisierung des Systemmodells werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht detailliert betrachtet. Der Fokus liegt auf der Entwicklung der Methodik. Die hier angesprochenen Aspekte sollen verdeutlichen, dass der Autor sich der Problematik bewusst ist und erste Lösungsansätze entwickelt wurden.

### 5.9.1 Grundlegende Überlegungen zur Rechnerunterstützung

Die Durchführung der dargestellten Methodik erfordert eine Rechnerunterstützung, die die notwendigen Werkzeuge zur Erstellung und Analyse des Systemmodells bereitstellt. Bei der Erstellung von Anforderungen kann grundsätzlich zwischen verschiedenen Bereichen unterschieden werden.

Zum einen ist die Darstellung des Systemmodells in Matrizenform nur bedingt für den (unerfahrenen) Anwender geeignet (siehe auch Kap. 6.3). Die Darstellung in Matrizen sowie der Umgang mit ihnen sollte daher so weit wie möglich vom Anwender ferngehalten werden. Er sollte stattdessen mit bekannten Modellen und Prozessdarstellungen (siehe Kap. 3.4.3) arbeiten. Weiterhin muss das Tool die unterschiedlichen Aufgaben und Analysen automatisiert unterstützen, so dass sich der Anwender rein mit der Analyse und Ergebnisinterpretation befassen kann.

Aus Sicht der vollständigen Prozessplanung ist die Betrachtung der reinen Struktur des Systems nicht ausreichend. Weiterhin ist die **zeitliche Dimension** zu integrieren. Zusätzlich müssen aus diesen Informationen die bekannten Darstellungen in Form von Ablaufplänen, PERT- oder Gantt-Diagrammen erzeugt werden können. Die Strukturplanung kann die Reihenfolge sowie Anordnung der Prozessschritte vorgeben, jedoch ist danach noch eine zeitliche Einordnung (Terminplanung) vorzunehmen.

Das Tool sollte zudem den **Rückgriff auf Best Practices** ermöglichen und die Nutzer von Routineaufgaben im Prozessablauf entlasten [REDENIUS 2006]. Dies kann durch das Bereitstellen eines Wissensspeichers mit generischen Prozessmodellen oder Prozessbausteinen, aus denen anwendungsspezifisch Entwicklungsprozesse instanziiert werden, geschehen. Weiterhin gehört dazu, dass die **Dokumentation der Prozessergebnisse** sowie das Auffinden vorhandener Produktdaten möglichst einfach zu gestalten ist.

Es sollte möglich sein, die Software in bestehende Prozessmanagementtools zu integrieren [REDENIUS 2006] oder bestehende Systeme zu ersetzen. Ein weiteres nicht kompatibles System in bestehende Strukturen aufzunehmen wirkt sich negativ auf dessen Akzeptanz in der Praxis aus. Eng damit verknüpft ist die **Integration bzw. Vernetzung mit bestehenden PDM und PLM Systemen**. Aus den in diesen Systemen enthaltenden Modellen (Anforderungsliste, Funktionsstruktur, Bauteilstruktur, CAD-Modell) können bestimmte strukturelle Informationen automatisiert abgeleitet und in das Strukturmodell übernommen werden. So kann die Vernetzung von Komponenten oder das Vorhandensein oder die Freigabe bestimmter Prozessergebnisse automatisiert aus den bestehenden Systemen abgeleitet werden.

Aus Perspektive der Anwender können in Anlehnung an [ROELOFSEN 2011, S.122] verschiedene **Gruppen bzw. Rollen** im Prozess unterschieden werden. Im vorliegenden Anwendungsfall bieten sich hierfür die Rollen Prozessplaner, Entwickler (operativ) sowie Verantwortlicher (strategisch) an. Diese haben jeweils spezifische Anforderungen und Sichten auf den Entwicklungsprozess. Die Visualisierung der Informationen muss sich darum an den Wünschen und Wissensständen der Nutzer orientieren. Um nutzerspezifische Informationen über einen Entwicklungsprozess bereitzustellen, ist es notwendig, unterschiedliche Prozesssichten für die verschiedenen Verwendungszwecke zu generieren, die unterschiedliche Benutzer mit einem Prozessmodell verbinden [WERTH 2007, S.129].

Einem **Prozessplaner** müssen sämtliche Möglichkeiten zur Erstellung und Manipulation des integrierten Modells zur Verfügung gestellt werden. Dazu muss er zwischen unterschiedlichen Sichten sowie zwischen Matrizenform und grafischer Analyse wechseln können. Zudem kann der Prozessplaner uneingeschränkt Änderungen am integrierten Systemmodell vornehmen und unter Verwendung eines bestehenden Wissensspeichers einen Soll-Prozess ableiten und für das aktuelle Projekt instanziiieren.

Für einen **Entwickler auf operativer Ebene** sind vor allem die Erhöhung des Systemverständnisses und die Visualisierung von Abhängigkeiten interessant. Die Darstellung der Matrizenform ist für ihn nicht interessant, er benötigt eine intuitive und verständliche Repräsentation des Systemmodells. Es bietet sich daher eine Darstellung des Prozesses mit seinen zu bearbeitenden Prozessschritten sowie der Abhängigkeiten zu anderen Bauteilen und Funktionen an. Für ihn stehen die Visualisierung des Systems und Analysemöglichkeiten von Abhängigkeiten im Mittelpunkt. Zudem muss er in die Lage versetzt werden, den aktuellen Status sowie den Fortschritt seiner Arbeitspakete bzw. zu bearbeitenden Prozessergebnisse darzustellen. Zudem könnte er im Falle von unvorhergesehenen Entwicklungen Vorschläge für Änderungen vornehmen, die vom Verantwortlichen noch freigegeben werden müssen.

Auf **strategischer Ebene sind Verantwortliche** (z. B. Projektleiter, Bauteilverantwortliche, Controller) an Kennzahlen und dem aktuellen Status des Prozesses bzw. Projektes interessiert. Weiterhin müssen sie Analysen über Änderungsauswirkungen vornehmen können, um im

Fälle von Änderungen bzw. Verzögerungen entsprechend zu reagieren und Alternativen abwägen zu können. Zudem müssen Verantwortliche auch die Berechtigung besitzen, im Fall von Änderungen oder Abweichungen von der Planung, das Modell zu Manipulieren und die Änderungsvorschläge der operativen Entwickler freizugeben. Diese müssen dann in das Modell übernommen werden.

Schließlich ist zur Anwendung und für eine gute Akzeptanz des Tools eine **ergonomische Umsetzung** ausschlaggebend. Das Tool sollte folglich **intuitiv und aufwandsarm** zu bedienen sowie einfach einsetzbar sein. Eine grafische Darstellung des Konzeptes für ein Rechnerwerkzeug zeigt Bild 5-30.

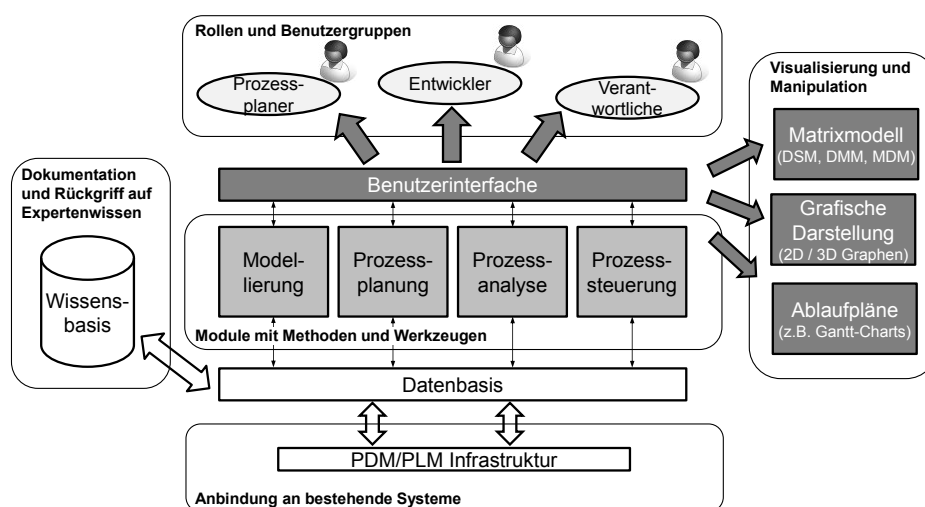


Bild 5-30: Konzept für ein Rechnerwerkzeug

### 5.9.2 Visualisierung des integrierten Produkt- und Prozessmodells

Wie zu Beginn des Kapitels bereits dargelegt, bildet die Visualisierung des matrixenbasierten Systemmodells einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz und Anwendbarkeit der entwickelten Methodik. Sie bildet ein Kernelement der Rechnerunterstützung, da mit der grafischen Repräsentation ein hohes **Systemverständnis** der enthaltenen Abhängigkeiten erreicht werden kann (siehe Kap. 3.3.2). Dies trägt zur Erhöhung der Transparenz bei und kann dadurch dazu beitragen, die **Kommunikation** zu verbessern.

Wie in Kap. 3.3.3 dargestellt, lassen sich die Elemente und Relationen innerhalb einer Domäne neben der matrixenbasierten Darstellung auch grafisch als dynamische, stärkebasierte Graphen darstellen. Diese Art der Darstellung ist in vielen Fällen deutlich aussagekräftiger als die Matrizenform, da hierdurch sehr einfach Abhängigkeiten sowie zentrale Elemente identifiziert werden können. Der entscheidende *Nachteil dieser Form der Visualisierung* ist, dass sie auf die *Abbildung einer Domäne beschränkt* ist. Es können somit nur die in den DSMs des integrierten Produkt- und Prozessmodells enthaltenen Informationen dargestellt werden.

Für die Unterstützung der transdisziplinären (mechatronischen) Entwicklung mit mehreren Disziplinen ist es entscheidend, dass mindestens zwei Domänen sowie deren domänenübergreifenden Abhängigkeiten gleichzeitig visualisiert und somit grafisch analysiert werden können. Zudem soll die Darstellung der Struktur innerhalb einer Domäne als stärkebasierter Graph erhalten bleiben, da sich diese Darstellungsform bewährt hat und etabliert ist. Die detaillierten Anforderungen an die Visualisierung des Systemmodells sind in Kap. 4.3 dargestellt.

Die dargestellten Zielsetzungen können unter Verwendung einer dritten Dimension in der Visualisierung erreicht werden. Auf dieser Grundidee wurde eine **dreidimensionale Visualisierung** von matrixbasierten Strukturmodellen entwickelt und prototypisch implementiert (siehe Bild 5-31).

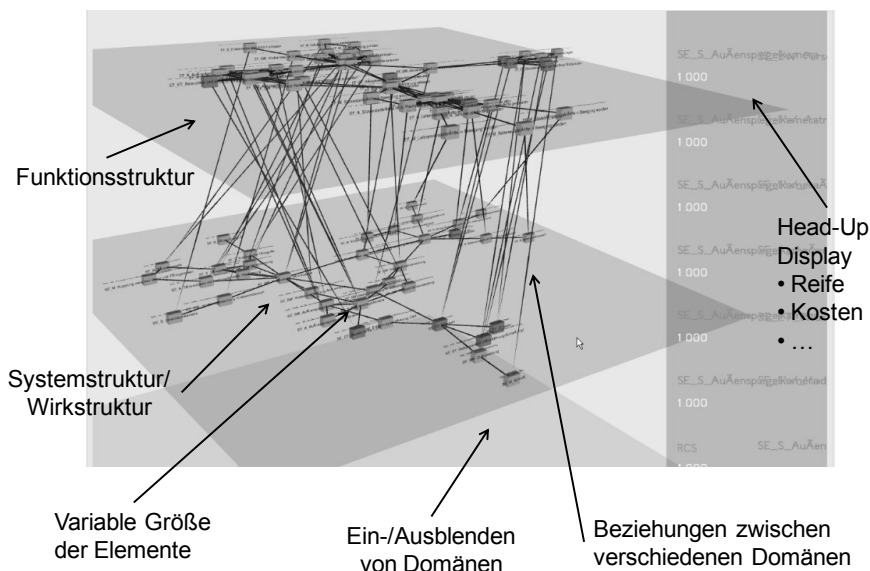


Bild 5-31: Dreidimensionale Visualisierung des integrierten Modells [nach DIEHL et al. 2008; DIEHL 2009]

Die dargestellte Visualisierung ermöglicht die dreidimensionale Visualisierung des Modells sowie die gleichzeitige Darstellung der sechs enthaltenen Domänen sowie deren Verknüpfung. Theoretisch ist die Anzahl der darstellbaren Domänen nicht begrenzt, so dass auch eine größere Anzahl möglich ist. Zur Darstellung der Strukturen einzelner Domänen werden *semi-transparente Ebenen* verwendet, die parallel zueinander im Raum angeordnet sind. Die Elemente und Relationen der Domänen (Informationen der DSMs) sind auf den Ebenen als *stärkebasierter Graph* abgebildet, was der bekannten Darstellung entspricht. Die Relationen zwischen den Domänen (Informationen der DMMs) werden als Linien zwischen Ebenen dargestellt. Auf diese Weise können **gleichzeitig mehrere Domänen** hinsichtlich ihrer **inter- und intradomänen Abhängigkeiten** analysiert werden.

Eine Einschränkung besteht hierbei in Bezug auf die domänenübergreifenden Abhängigkeiten. Aus Übersichtsgründen können nur Relationen zwischen direkt benachbarten Ebenen dargestellt werden. Dies lässt sich jedoch durch Verschieben der Ebenen (siehe unten) umgehen, so dass sämtliche in der Matrix enthaltenen Abhängigkeiten dargestellt werden können.

In Bild 5-31 ist ein beispielhaftes Produktmodell mit der enthaltenen Funktions- und Wirkstruktur sowie deren Verknüpfung dargestellt. Darunter ist in eine weitere Ebene mit einer zusätzlichen Domäne (bspw. Personen oder Prozessschritte) angedeutet.

Zur Exploration und Analyse des Systemmodells ist es möglich, sich ähnlich wie in einem 3D-CAD System *frei durch den Raum zu bewegen*. Hierbei werden bekannte Funktionen wie lineare Bewegung, Drehung und Zoom unterstützt. Somit können gezielt einzelne Ausschnitte des Systems betrachtet werden. Durch *paralleles Verschieben* der Ebenen können Relationen zwischen unterschiedlichen Domänen eingeblendet und untersucht werden. Weiterhin wurde am rechten Bildrand ein *Head-Up Display* realisiert, mit dem weitere elementspezifische Eigenschaften (wie Entwicklungsfortschritt, Kosten, etc.) angezeigt werden können. Weiterhin können auch Größe und Farbe der Elemente zur Darstellung von Zusatzinformationen verwendet werden.

Zur Durchführung von detaillierten Analysen besteht die Möglichkeit, einzelne *Ebenen vollständig Ein- und Auszublenden*. Ebenso wird die Analyse der direkten Umgebung von Elementen ermöglicht. Dazu werden bei Selektion sämtliche nicht direkt mit dem Element verbundenen Elemente und Relationen ausgeblendet. Dies kann durch Anklicken des Elementes selbst oder über das Head-Up-Display erfolgen. Dies ermöglicht beispielsweise die Analyse von Änderungsauswirkungen sowie das Aufstellen von transdisziplinären Wirkketten.

In seinem aktuellen Entwicklungsstand ist der Softwareprototyp auf die Visualisierung und Analyse zur Visualisierung bzw. Analyse von matrixenbasierten Strukturmodellen fokussiert. Die Erstellung und Manipulation des Modells ist bisher nicht implementiert, die entsprechenden Daten werden aus separat zu erstellenden Matrizen importiert. Weiterhin sind keine Möglichkeiten zur Strukturanalyse sowie zur Berechnung von Kennzahlen enthalten, die im Kontext dieser Arbeit zur Unterstützung der Prozessplanung und -analyse benötigt werden. Die Weiterentwicklung und Implementierung dieser und weiterer Funktionalitäten ist Teil der aktuellen Forschungsarbeit.

Für detaillierte Informationen zur 3D-Visualisierung von Systemstrukturen, dem daraus entstandenen prototypischen Rechnerwerkzeug "3D-MECHGRAPH" sowie dessen technische Umsetzung sei auf [DIEHL et al. 2008; DIEHL 2009] verwiesen.



## 6. Evaluierung der transdisziplinären Prozessunterstützung mechatronischer Produkte

*Im Folgenden wird die im vorherigen Kapitel beschriebene Methodik zur Planung und Synchronisation transdisziplinärer mechatronischer Entwicklungsprozesse anhand eines industriellen Entwicklungsprojektes angewandt und evaluiert. Eine erste grundlegende Evaluation der entwickelten Methoden und Werkzeuge konnte aufgrund der hohen Verfügbarkeit von Produkt- und Prozessinformationen anhand des mechatronischen Bremssystems durchgeführt werden. Da es sich bei diesem System um eine studentische Entwicklung im Rahmen eines Forschungsprojekts handelt, können die hieraus gewonnenen Ergebnisse nicht ohne Einschränkungen auf Serienentwicklungsprozesse in der Industrie übertragen werden.*

*Aus diesem Grund wird darauf aufbauend zur erweiterten Evaluation die Serienentwicklung eines mechatronischen Teilsystems in der Automobilindustrie betrachtet. Anhand dessen kann die Anwendbarkeit der Modellierungs- und Prozessunterstützungsmöglichkeiten aufgezeigt, sowie die Unterstützung der Prozessplanung sowie der Synchronisation in einem realitätsnahen, industriellen Umfeld nachgewiesen werden. Einen weiteren Teil der Evaluation bilden die Darstellung von Rückmeldungen und Diskussionen aus dem wissenschaftlichen und industriellen Umfeld. Die aus diesen beiden Teilen der Evaluation gewonnenen Erkenntnisse wurden abschließend zu einer gesamthaften Beurteilung der entwickelten Methodik hinsichtlich der gestellten Anforderungen zusammengeführt.*

### 6.1 Entwicklung eines Schiebehebedachs in der Automobilindustrie

Die Mechatronik hält zunehmend Einzug in Gegenstände und Anwendungen des Alltags. In der Automobilbranche werden mittlerweile eine Vielzahl von Funktionen und Innovationen mit Hilfe von mechatronischen Systemen realisiert (vgl. Kap. 2.1). Ein Beispiel für ein solches Teilsystem stellt das Schiebehebedach (SHD) dar.

Dieses Anwendungsobjekt wurde im Rahmen des Projektes MechaTUM (siehe Kap. 1.3) erarbeitet und in Auszügen bereits in unterschiedlichen Veröffentlichungen verwendet [FISCHER et al. 2008; SCHARFENBERGER et al. 2009; ELEZI et al. 2011; HELLENBRAND et al. 2012]. Aus Gründen der Geheimhaltung können die erstellten Produkt- und Prozessmodelle sowie die daraus abgeleiteten Analyseergebnisse nur in Auszügen dargestellt werden.

Das Schiebehebedach hat sich im Laufe der Zeit von einem rein mechanischen Produkt zum Öffnen und Schließen des Fahrzeugdaches hin zu einem komplexen System entwickelt, welches einen erheblichen Einfluss auf den Komfort des Fahrzeuges hat. Aktuelle Systeme ermöglichen nicht nur ein teil- und vollautomatisches Öffnen und Schließen des Daches, sondern erhöhen zusätzlich den Komfort durch geschwindigkeitsabhängige Anpassung der Öffnungsweite zur Reduktion von Windgeräuschen. Darüber hinaus sind sie in der Lage, das Einklemmen eines Körperteils oder Gegenstandes zu erkennen und den Schließvorgang zu unterbrechen.

Im Rahmen der durchgeführten Evaluation wird der Serienentwicklungsprozess einer bestimmten Variante eines Schiebehebbedachs für ein neues Fahrzeug der Oberklasse betrachtet (Bild 6-1). Das grundlegende Funktionskonzept sowie zentrale Teile der Wirkstruktur des technischen Produktes sind aufgrund des bereits laufenden Serieneinsatzes in anderen Fahrzeugmodellen im Wesentlichen bekannt und abgesichert. Es liegt somit eine fahrzeugspezifischen Anpassungskonstruktion vor, die in das neue Fahrzeug integriert und abgesichert werden muss.

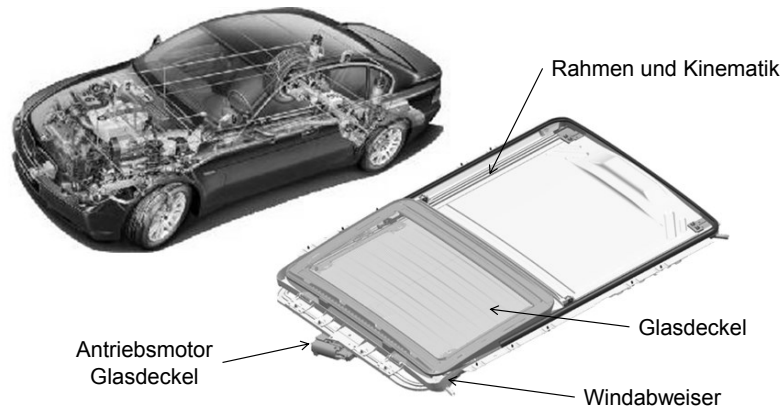


Bild 6-1: Schiebehebbedach eines Fahrzeugs der Oberklasse  
(Bilder mit freundlicher Genehmigung der BMW AG)

Wie oben kurz beschrieben, besitzt das Teilsystem Schiebehebbedach aus Kundensicht vier zentrale Funktionen: teilautomatisches Bewegen, vollautomatisches Bewegen, Einklemmschutz sowie Geräuschreduzierung. Die ersten beiden sind für die Interaktion des Kunden mit dem Produkt relevant, die letzten beiden können vom Kunden nicht aktiv beeinflusst werden sondern sind permanent aktiv. Beim teilautomatischen Öffnen bzw. Schließen des Daches hält der Kunde den Schalter gedrückt bis die gewünschte Öffnungsweite bzw.-winkel des Glasdeckels erreicht ist. Sobald der Schalter losgelassen wird stoppt die Bewegung und der Glasdeckel bleibt in der erreichten Position stehen. Die zweite Bedienungsmöglichkeit ist das vollautomatische Bewegen des Glasdeckels, welche auch als Komfortöffnen bzw. -schließen bezeichnet wird. In diesem Fall drückt der Kunde den Schalter über einen Widerstand hinaus und der Deckel bewegt sich auch nach Loslassen des Schalters bis in die jeweilige Endposition weiter. Eine Unterbrechung dieser Bewegung ist durch das erneute Drücken des Schalters möglich.

Mit der Bewegung des Glasdeckels ist außerdem die Verschiebung des darunter liegenden Dachhimmels verbunden. Dieser ist in der betrachteten Ausführung über einen separaten Motor realisiert (nicht im Bild dargestellt) und an die Bewegung des Glasdeckel gekoppelt. In der hier betrachteten Ausführung erfolgt eine Verschiebung des Dachhimmels während des Öffnens automatisch mit dem Dach. Das Schließen erfolgt über erneutes Drücken des Schalters.

Der Einklemmschutz ist eine nicht vom Benutzer direkt beeinflussbare Funktion und trägt erheblich zur Erhöhung der Sicherheit bei, da durch sie die Bewegung des Deckels beim Einklemmen von Körperteilen oder Gegenständen gestoppt wird. Diese Funktion ist während des Verfahrens ständig aktiv. Die Erkennung einer Einklemmsituation erfolgt über die Messung



des Motorstromes. Aus der Position des Daches sowie den bestehenden Umgebungsbedingungen (Temperatur, Sonneneinstrahlung, etc.) wird die gemessene Stromstärke zum Schließen des Daches mit einem hinterlegten Sollwert verglichen. Ist die aktuelle Stromstärke höher als die der hinterlegten Kennlinie wird ein Einklemmen erkannt, die Bewegung gestoppt und das Dach um einen definierten Weg weiter geöffnet (reversiert).

Die Funktion der Geräuschreduzierung ist eine reine Komfortfunktion und wird vom Kunden nur indirekt wahrgenommen. Abhängig von den Umgebungsbedingungen, der Position des Deckels sowie der Fahrgeschwindigkeit wird eine Öffnungsweite bestimmt, in der die Windgeräusche im Inneren des Fahrzeuges minimal sind. Dies wird zusätzlich über einen mechanisch mit dem Glasdeckel gekoppelten Windabweiser erreicht, dessen Winkel abhängig von der Öffnungsweite des Daches eingestellt wird.

Die Bedienung und Steuerung des Schiebehebbedachs erfolgt über ein Modul an der Fahrzeugdecke. In diesem sind neben dem Steuergerät sowie dem Bedienschalter noch weitere Taster sowie Beleuchtungselemente untergebracht. Diese sind für die vorliegende Evaluation nicht relevant und werden daher nicht weiter betrachtet.

### 6.1.1 Erstellung des integrierten Produkt- und Prozessmodells

Die Grundlage für die Prozessplanung und -analyse bildet die Modellierung des technischen Systems Schiebehebbedach sowie des zugehörigen Entwicklungsprozesses. Das hierbei angewandte Vorgehen richtet sich nach dem allgemeinen Vorgehensmodell (siehe Kap.5.4) und kann in vier Phasen geteilt werden. Zunächst die Datenakquisition, in der die erforderlichen Informationen gesammelt und aufbereitet werden. Im Anschluss erfolgen jeweils separat die Erstellung des Produktmodells sowie des Prozessmodell mit abschließender Verifikation durch am Prozess beteiligte Entwickler. Im letzten Schritt werden die beiden Partialmodell zum Gesamtmodell verbunden und ebenfalls durch Expertengespräche verifiziert.

In der **Datenakquisition** wurden zwei unterschiedliche Arten von Informationsquellen herangezogen. Zum einen konnte auf beim Unternehmen **vorhandene Dokumente** (Artefakte) wie Komponenten- und Zusammenbauzeichnungen, Stücklisten, Prozess- und Rollenbeschreibungen sowie Lastenhefte zurückgegriffen werden. Diese wurden nach Relevanz für den betrachteten Anwendungsfall strukturiert und aufbereitet. Zum anderen wurden **Expertengespräche mit beteiligten Entwicklern** durchgeführt, um nicht in den PDM-Systemen oder Dokumenten enthaltene Informationen zu erhalten. In den späteren Phasen wurden diese Gespräche zur Verifikation bzw. Korrektur der erstellten Modelle genutzt.

Zur **Erstellung des Produktmodells** (*Schritt 1* im Vorgehensmodell) wurden zunächst die Komponentenhierarchie (Komponenten, Baugruppen, Module) sowie die Wirkstruktur erstellt. Die Modellierung erfolgte zunächst grafisch und wurde anschließend in die Matrixform übertragen. In der Wirkstruktur wurde eine aggregierte Sicht aus geometrischen Abhängigkeiten, Stoff-, Energie- und Informationsflüssen verwendet. Die Erstellung einer Funktionsstruktur in Form eines umsatz- oder relationsorientierten Funktionsmodells (vgl. Kap. 5.5.2) konnte nicht durchgeführt werden, da die hierfür notwendigen Informationen nicht vorlagen oder nur mit erheblichem Aufwand hätten beschafft werden können. Es wurde daher eine Funktionshierarchie (Kundenfunktionen, Systemfunktionen, technische Funktionen) erstellt. Die

identifizierten technischen Funktionen konnten mit vertretbarem Aufwand mit den Komponenten verknüpft werden (Bild 6-3 rechts). Diese Abhängigkeiten wurden ebenfalls in die Matrix übertragen, wodurch eine Berechnung von Funktionsstrukturen ermöglicht wird.

Einen Auszug der Ergebnisse der Modellierung der Produktarchitektur zeigt Bild 6-2, in dem die Wirkstruktur sowie die berechnete Wirkungs-Funktionsstruktur (vgl. Kap. 5.5.2) dargestellt sind. In der Wirkstruktur wurden zum besseren Verständnis die Elemente disziplinspezifisch eingefärbt. Somit sind die Partitionierung des Systems sowie disziplinübergreifende Abhängigkeiten und Schnittstellen leicht erkennbar. Ebenso wurden Komponenten aufgenommen, die nicht zum Entwicklungsumfang selbst gehören, jedoch essentiell für die Funktionserbringung sind, da sie Eingangsinformationen bereitstellen (Peripherie). Aus der Darstellung ist die zentrale Stellung des Steuergerätes sowie der Softwarekomponenten „Einklemmschutz“ und „Anti-Wummer Steuerung“ erkennbar. Diese bilden auch die zentralen mechatronischen Funktionen des SHD ab. Die Wirkungs-Funktionsstruktur (links im Bild) wurde nicht nativ aufgenommen, sondern abgeleitet. In ihr ist ebenfalls erkennbar, dass die am Einklemmschutz sowie der Geräuschreduzierung beteiligten Funktionen eine zentrale Stellung einnehmen und einen hohen Vernetzungsgrad mit anderen Funktionen aufweisen.

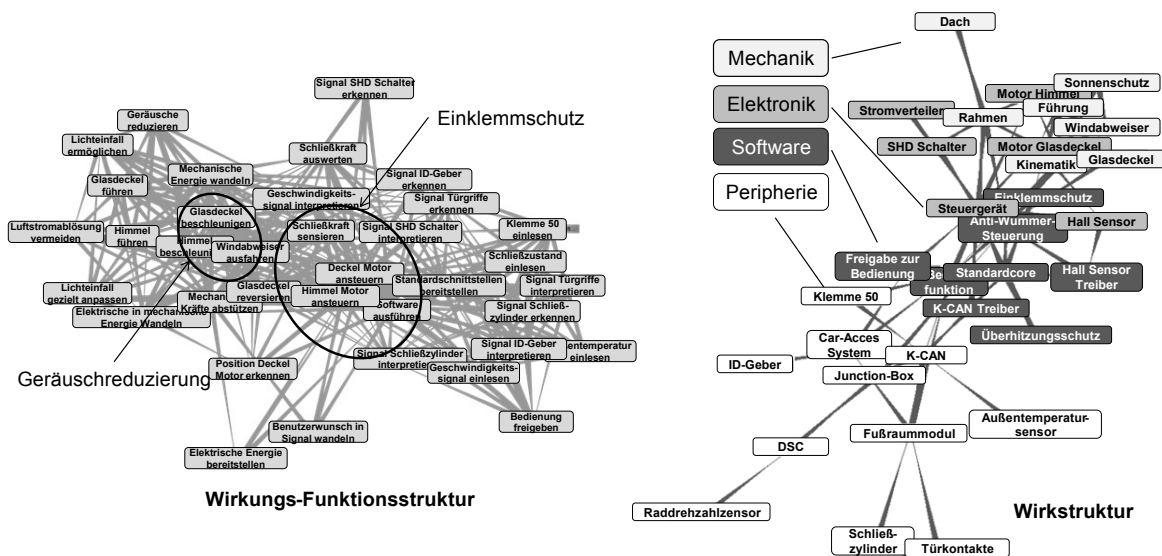


Bild 6-2: Modellierung der Wirkstruktur sowie abgeleitete Wirkungs-Funktionsstruktur des Schiebehedachs

Im Anschluss wurde die **Modellierung des Entwicklungsprozesses (Schritt 2)** durchgeführt. Da bereits ein Entwicklungsprozess vorlag, der im Modell abgebildet werden musste, wurden auch in diesem Fall zunächst die erforderlichen Informationen akquiriert, aufbereitet und im Anschluss in die Matrixmodellierung übertragen. Auch in diesem Fall wurde als Zwischenschritt zunächst eine ablauforientierte, grafische Modellierung des Prozesses sowie der darin enthaltenen Prozessergebnisse und Abhängigkeiten der Prozessschritte erstellt (siehe Bild 6-4). Diese Form der Darstellung war aufgrund der einfachen Verständlichkeit primär zur Darstellung und Verifikation des modellierten Prozesses in den Expertengesprächen vorgesehen. Zur Erstellung wurden grundsätzlich die gleichen Schritte wie in der Prozessplanung durchlaufen. Es wurden daher zunächst aus vorhandenen Prozessbeschreibungen die Meilen-

steine identifiziert (*Schritt 4*). Diesen wurden die zur Erfüllung notwendigen Prozessergebnisse (Schritt 5) zugeordnet. Im Anschluss wurden die zur Erstellung der Prozessergebnisse notwendigen Prozessschritte eingefügt und miteinander verknüpft (*Schritt 6*, Bild 6-3 links). Zur Vervollständigung des Prozessmodells wurden Personen mit den Prozessschritten verknüpft (*Schritt 7*). Aufgrund der Vielzahl beteiligter Personen wurden im vorliegenden Fall keine einzelnen Entwickler sondern Entwicklungsabteilungen modelliert.

Zur Erstellung des gesamthaften integrierten Produkt- und Prozessmodells wurden das **Produkt- und das Prozessmodell** über die Verknüpfung von Komponenten und Prozessergebnissen miteinander **verbunden** (*Schritt 3*, Bild 6-3 Mitte). Im Anschluss konnten weitere Teilmatrizen des Modells zur detaillierten Analyse berechnet werden. Auf Teile der Ergebnisse dieser Analysen wird in Kap. 6.1.3 näher eingegangen.

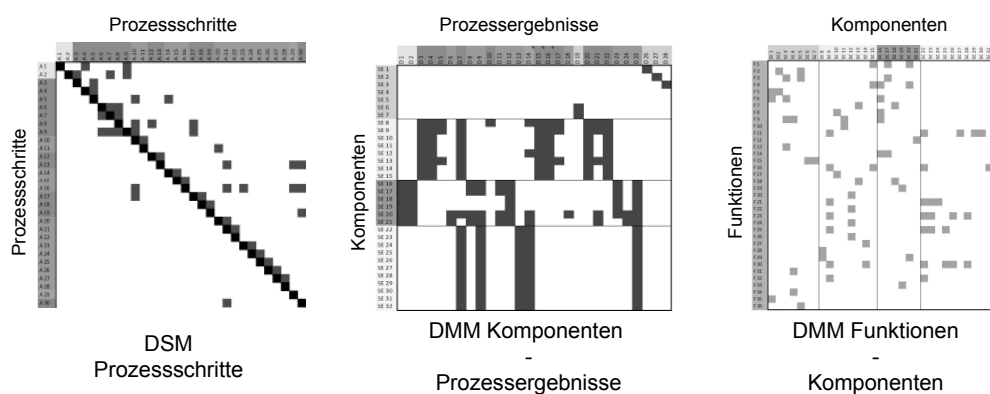


Bild 6-3: Auszug der erstellten Matrizen des Produkt- und Prozessmodells [nach HELLENBRAND et al. 2012]

Das erstellte Produktmodell umfasst insgesamt, inklusive der nicht direkt zum Entwicklungsumfang gehörenden Elemente, 36 Funktionen und 32 Komponenten. Das Prozessmodell besteht aus insgesamt 10 Meilensteinen, 166 Prozessschritten sowie 72 Prozessergebnissen. Außerdem wurden 13 Entwicklungsabteilungen (Personen) verknüpft. Somit ergibt sich für das Gesamtmodell eine Matrix mit 329 Zeilen und Spalten, weshalb hier nur Auszüge dargestellt werden. Der Umfang des Modells unterstreicht zudem nochmals die Notwendigkeit einer Toolunterstützung.

## 6.1.2 Prozessplanung auf Basis der Produktarchitektur

Im Anschluss an die erfolgreiche Modellierung des technischen Produktes sowie des zugehörigen Entwicklungsprozesses mit Hilfe des integrierten Produkt- und Prozessmodells, wurde die **Prozessplanung auf Basis der Produktarchitektur** betrachtet. Hierbei ist vor allem die Ableitung der Entwicklungsreihenfolge auf Basis von Strukturanalysen der Produktarchitektur von Interesse, da diese die Abfolge der Meilensteine und somit die Grobstruktur des Prozesses vorgibt. Sind die hieraus abgeleiteten Ergebnisse plausibel, kann mit Hilfe der weiteren Vorgehensschritte ein disziplinübergreifend synchronisierter Prozess erstellt werden.

Zur Evaluation der entwickelten Methodik zur Unterstützung der Prozessplanung wird ein **Vergleich der Ergebnisse der Strukturanalysen** auf Basis der Produktarchitektur mit dem im Unternehmen vorhandenen **Soll-Entwicklungsprozess** des Schiebebedachs durchgeführt. Da dieser Prozess in der Vergangenheit in seiner Grundstruktur bereits mehrfach erfolgreich angewandt wurde, sind seine grundsätzliche Durchführbarkeit sowie seine Effektivität bereits nachgewiesen. Die vorhandenen Strukturen und Abläufe im Prozess haben sich auf Grundlage von Erfahrungen in der Vergangenheit herausgebildet, wurden inkrementell verbessert und führen zu einem Sollprozess, er als Referenz verwendet werden kann. Die festgestellten Probleme liegen nicht in grundsätzlichen Prozessaufbau, sondern in der mangelnden Vernetzung der Disziplinen, der Unkenntnis übergreifender Abhängigkeiten sowie daraus resultierenden Abweichungen von Sollprozess.

Da die Entwicklung des Systems im untersuchten Unternehmen zum betrachteten Zeitpunkt primär komponentenorientiert abläuft (Freigabe von Komponentenzeichnungen), ist ein direkter Vergleich der Funktionsentwicklung und -integration nicht möglich. Es musste daher zunächst der vollständige Prozess erfasst und abgebildet werden (vgl. Kap. 6.1.1). Aus der Dokumentation der Absicherung sowie den zu den Meilensteinen vorliegenden Prozessergebnissen konnte im Anschluss auf den Zustand der Komponenten sowie die abzurufenden Funktionen geschlossen werden.

Die notwendigen **Informationen zur Modellierung** des Sollprozesses wurden aus im Unternehmen vorhandenen Dokumenten zu Prozess- und Rollenbeschreibungen sowie Gesprächen mit Entwicklern extrahiert und aufbereitet. Anschließend konnten diese Einzelinformationen zu einem domänenübergreifenden Gesamtprozess zusammengefügt werden, der mit geringen Aufwand in die Matrixdarstellung überführt werden konnte (siehe Bild 6-4). Abschließend wurde der Gesamtprozess nochmals über Expertengespräche abgesichert.

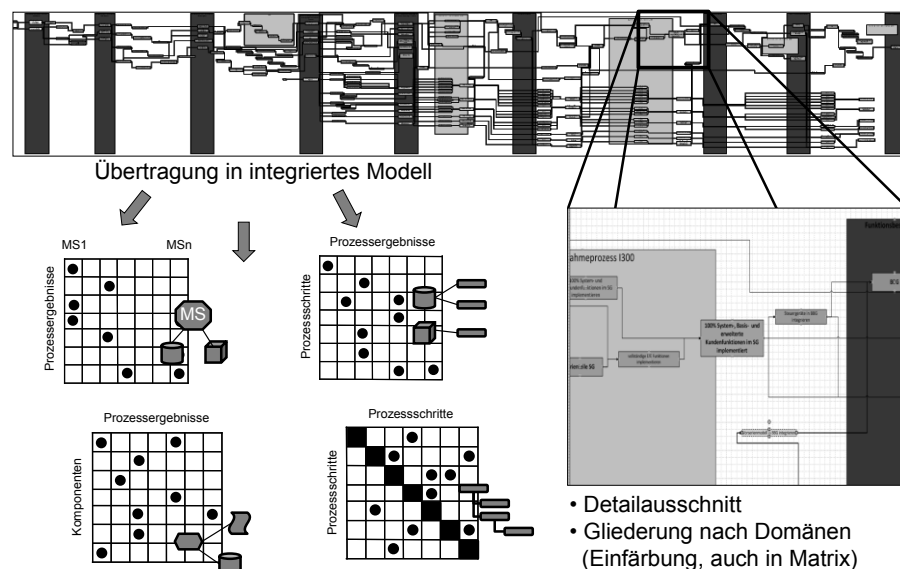


Bild 6-4: Modellierung des SHD - Entwicklungsprozesses und Übertragung in die Matrixdarstellung

Die Struktur des Entwicklungsprozesses des Schiebebedachs, als Teilprozess einer gesamten Fahrzeugentwicklung, kann in vier grundsätzliche Phasen untergliedert werden. Zunächst findet die Entwicklung der **Bordnetzarchitektur** statt. Diese erfolgt über das gesamte Fahrzeug und legt unter anderem fest, welche Energieversorgung für die einzelnen Teilsysteme zur Verfügung steht und welche Daten auf den im Fahrzeug vorhandenen Bussystemen verfügbar sind. Im Anschluss erfolgt die **Grobkonstruktion** bzw. Gestaltung der einzelnen Komponenten sowie die Prüfung ihrer Kompatibilität (Geometrie, Anschlüsse, Signale). Im Anschluss erfolgt die **Absicherung und Detaillierung der Komponenten**, bis ein vollständiges und funktionsfähiges System vorliegt. In der letzten Phase der **Parametrierung** werden lediglich finale Parameterabstimmungen an Steuergeräten zur Realisierung mechatronischer Systemfunktionen vorgenommen.

Die **Ergebnisse der Analysen** der Produktarchitektur zeigen, dass die ermittelte Reihenfolge zur Entwicklung und Integration der Funktionen *sehr gut mit diesen Phasen übereinstimmen*. In Bild 6-5 sind Ergebnisauszüge der Strukturanalyse der Wirkungs-Funktionsstruktur dargestellt. Die Reihenfolge der Funktionsentwicklung ist in Bezug auf die Kritikalität der Funktionen vorgenommen und von unten nach oben angeordnet. Es ist zu erkennen, dass die Reihenfolge in Bezug auf Vernetzungsgrad sowie Kritikalität in großen Teilen identisch ist. Die vorhandenen Unterschiede würden keine grundsätzlich andere Prozessstruktur nach sich ziehen und verdeutlichen, dass die Strukturmerkmale in Kombination betrachtet werden müssen.

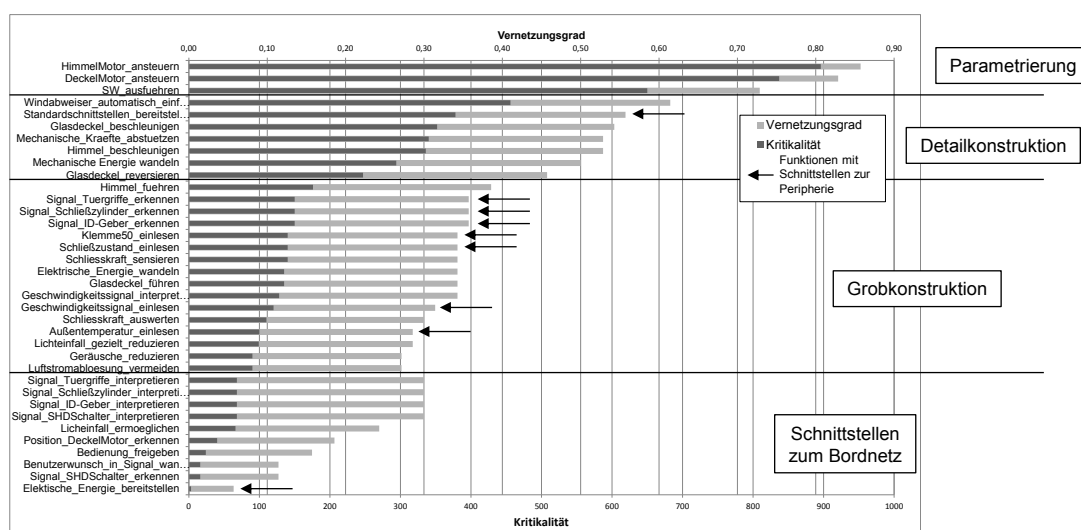


Bild 6-5: Analyse der Funktionsstruktur zur Ableitung des Prozessplans SHD

Nach den Ergebnissen der Strukturanalysen werden zunächst Funktionen wie „Elektrische Energie bereitstellen“ oder „Bedienung freigeben“ entwickelt, die selbst nicht zum Entwicklungsumfang des Systems gehören bzw. viele Schnittstellen zu anderen Systemen im Fahrzeug aufweisen (Peripherie). Die Freigabe der Bedienung ist eine Grundfunktion des Systems, die zunächst in Abhängigkeit des Fahrzeugzustandes (Fahrzeug offen/geschlossen, Schlüsselsignal erkannt, Motor an/aus, etc.) die grundsätzliche Betriebsbereitschaft des SHD freigibt. Dazu werden über den Fahrzeugbus diverse Signale eingelesen und interpretiert. Nach der Struk-

turanalyse der Funktionsstruktur sind die Funktionen zum Einlesen dieser Signale jedoch zeitlich später angeordnet (siehe Pfeile in Phase Grobkonstruktion, Bild 6-5), was zunächst unlogisch erscheint und eine erhebliche Abweichung vom Referenzprozess darstellt. Die hohe Kritikalität bzw. Vernetzungsgrad dieser Funktionen ist darauf zurückzuführen, dass sie indirekt Einfluss auf andere Funktionen besitzen und zudem alle über den CAN-Bus des Fahrzeuges realisiert werden. Aus der physikalischen Funktionsstruktur (nicht dargestellt) ist erkennbar, dass sie gemeinsam mit „Bedienfunktion freigeben“ einen isolierten Cluster bilden. Die Funktionen dieses Clusters sollten daher gemeinsam entwickelt werden und die entsprechenden Funktionen zum Einlesen der Signale, wie im definierten Soll-Prozess vorgesehen, in die erste Entwicklungsphase vorgezogen werden. Im Kontext der Gesamtfahrzeugentwicklung ist dies ebenfalls erforderlich, da frühzeitig festgelegt werden muss, welche Signale von welchen Teilsystemen verwendet werden. Aus rein funktionaler Sicht ist die Anbindung an den CAN-Bus (Integration) erst später möglich, da zur Entwicklung der Bedienfreigabe auch virtuelle Signalvorgaben verwendet werden können.

Im Anschluss erfolgen die Grob- und Detailkonstruktion sowie die finale Parametrierung des Systems, die aus struktureller sowie funktionaler Perspektive *keine wesentlichen Abweichungen zum vorhandenen Referenzprozess* aufweisen. Analog zu oben beschriebener Konstellation nehmen die Funktionen „Außentemperatur einlesen“ und „Geschwindigkeitssignal einlesen“ eine Sonderstellung ein, da sie aufgrund der Abhängigkeit zum Bordnetz ebenfalls bereits in der ersten Phase berücksichtigt (konzipiert) werden müssen. Zur Darstellung der Funktionen des Schiebebedachs werden sie ebenfalls erst in später im Prozess benötigt und können in Konsequenz auch erst zum benötigten Zeitpunkt realisiert (implementiert) werden.

Eine weitere Besonderheit stellt die Funktion „Standardschnittstellen bereitstellen“ dar, die nach den Ergebnissen der Strukturanalyse erst zu einem sehr späten Zeitpunkt im Prozess realisiert wird (hohe Vernetzung zu anderen Softwarekomponenten). Es erscheint nicht sinnvoll diese Standardschnittstellen erst sehr spät festzulegen, da sämtliche andere Funktionen darauf zugreifen bzw. aufbauen. Die Realisierung dieser Funktion erfolgt über die Softwarekomponente „Standardcore“, die das Betriebssystem des Steuergerätes darstellt und in der auch die Anbindung an den CAN-Bus realisiert ist. Wie oben dargestellt, wird das vollständig implementierte Betriebssystem aus funktionaler Sicht erst in der finalen Ausführung des Steuergerätes benötigt. Für die Entwicklung der Einzelfunktionen müssen nur die entsprechenden Schnittstellen definiert sein. Der Standardcore ist weiterhin nicht Teil der Entwicklung des Schiebebedachs, da er auf mehreren Steuergeräten zum Einsatz kommt und dementsprechend bereits zu Beginn der Entwicklung festgelegt wird. Da zudem auf dem Steuergerät des SHD weitere, nicht zum Entwicklungsumfang gehörende, Funktionen realisiert sind, ist ebenfalls eine frühzeitige Realisierung der Funktion „Standardschnittstellen bereitstellen“ erforderlich. Ohne sie ist zudem eine Absicherung im Fahrzeug im Verbund mit anderen Systemen nicht möglich.

Auf Basis der Strukturanalysen wurde eine **Grobplanung eines Entwicklungsprozesses** durchgeführt. Dieser wurde anschließend den beteiligten Entwicklern vorgelegt und dessen *Anwendbarkeit bestätigt*. Eine vollständige Durchführung des Prozesses zum Nachweis von Effektivität, Effizienz und Verbesserung der disziplinübergreifenden Synchronisation war aus Gründen der Gesamtprozessdauer (ca. 5 Jahre) im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Als Fazit zur Prozessplanung lässt sich festhalten, dass die Anwendbarkeit des entwickelten Vorgehens sowie die Belastbarkeit der Ergebnisse gezeigt werden konnten. Mit Hilfe der entwickelten Methoden konnte ein in sich konsistenter und ausführbarer Prozess erstellt werden, der zu Bedürfnissen und etablierten Vorgehensweisen in der Industrie kompatibel ist. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass mit der systematischen Unterstützung eine wesentliche Vereinfachung der Prozessplanung sowie der Synchronisation der Disziplinen erreicht wird.

### 6.1.3 Ergebnisauszüge der entwicklungsbegleitenden Analyse

Auf Basis der erstellten Produkt- und Prozessmodellierung wurden entwicklungsbegleitend unterschiedliche Analysen zur Erhöhung des Systemverständnisses sowie zur Verbesserung der Synchronisation der Disziplinen durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden in vorgestellt und diskutiert.

Die Analyse von **disziplinübergreifenden Wirkzusammenhängen und Änderungsauswirkungen** wurde auf ein Problem in der Entwicklung angewandt, welches von den Prozessbeteiligten als charakteristisch für die oftmals unzureichende Synchronisation der Disziplinen beschrieben wurde. Aufgrund unzureichender Kenntnisse über disziplinübergreifende Zusammenhänge traten Fehler bei funktionsabprüfenden Integrationstests auf, die zu langwierigen Iterationen führten. Im konkreten Anwendungsfall wird die Änderung an der Dichtung des SHD betrachtet, welche ein Bestandteil der Führung des Glasdeckels ist. Aus Gründen der Haltbarkeit wird ein beständigeres Material verwendet, die geometrische Form bleibt identisch zur Ausgangslösung. Es liegt somit eine Änderung an einer rein mechanischen Komponente vor, welche aufgrund der identischen Geometrie keine Änderungen an anderen Mechanikkomponenten erfordert. In Folge dieser Änderung ist im nächsten Integrationstest weder ein Öffnen noch Schließen des Deckels möglich.

Die Wirkkette zur Erklärung dieses Fehlers hat ihre Ursache in einer geänderten Eigenschaft des Dichtungsmaterials. Der Reibungskoeffizient des neuen Materials ist höher als in der Ausgangslösung, so dass für die Bewegung des Glasdeckels eine höhere Kraft erforderlich ist. Die hierfür benötigte höhere Stromstärke des Antriebsmotors stimmt somit nicht mehr mit den im Steuergerät hinterlegten Kennlinien (Sollstromstärke) überein. Infolge dessen wird ständig eine Einklemmsituation erkannt und das Steuergerät verhindert die Bewegung des Glasdeckels.

Diese *disziplinübergreifende Abhängigkeit* zwischen der Parametrierung einer Softwarekomponente sowie der Mechanik kann mit Hilfe des integrierten Produkt- und Prozessmodells sehr einfach und transparent identifiziert werden. Sowohl in der Wirkungs-Funktionsstruktur wie auch in der Wirkstruktur ist eine direkte Relations zwischen der Softwarekomponente Einklemmschutz sowie der Führung des Glasdeckels zu erkennen (Bild 6-6 oben). Der für die Änderung der Dichtung verantwortliche Entwickler kann somit potentiell betroffene Komponenten und Funktionen sehr einfach und schnell identifizieren und die entsprechenden Entwickler auch disziplinübergreifend informieren. Diese müssen im Anschluss überprüfen, ob die Änderung eine Relevanz für ihre Entwicklungsumfänge hat und weitere Anpassungen erfordert. Bei einer zu hohen Anzahl von Folgeänderungen oder hohen Folgekosten kann auf

die geplante Änderung unter Umständen insgesamt verzichtet werden. Somit werden auch Entscheidungen durch eine verbesserte Informationsbasis unterstützt.

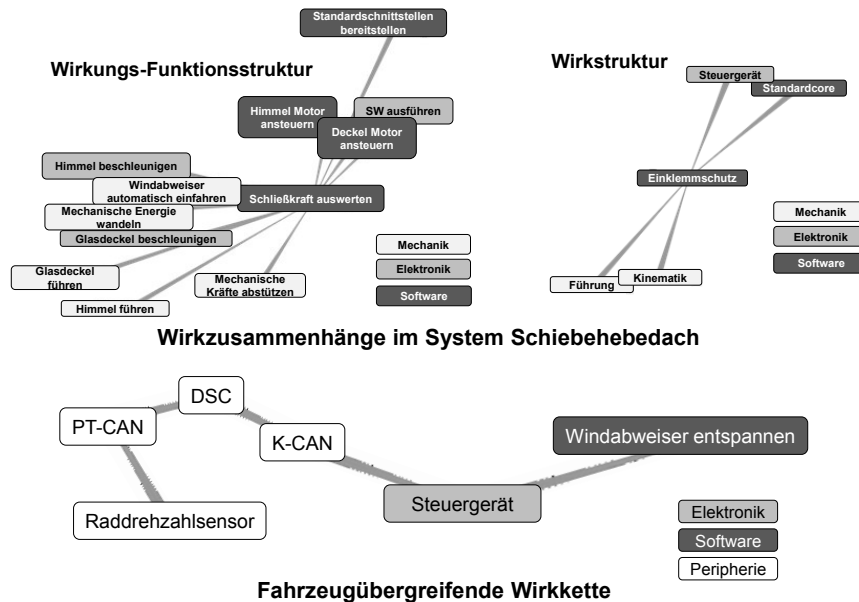


Bild 6-6: Disziplinübergreifende Abhängigkeiten im Schiebebedach

In Bild 6-6 ist weiterhin unten eine fahrzeugübergreifende Wirkkette dargestellt. Aus dieser ist ersichtlich, dass Änderungen bzw. Fehler der Raddrehzahlsensoren potentielle Auswirkungen auf die Geräuschreduzierung besitzen können. Diese Abhängigkeiten müssen bei der Konzipierung von funktionsabprüfenden Integrationstests sowie bei Änderungen berücksichtigt werden. Die Funktion „Windabweiser entspannen“ kann nur sinnvoll getestet werden, wenn sämtliche Elemente der Wirkkette wie Drehzahlsensoren und das DSC den erforderlichen Entwicklungsstand erreicht haben und die Signale auf den verschiedenen Bussystemen des Fahrzeugs zur Verfügung stehen. Alternativ kann auf virtuelle Eingangssignale zurückgegriffen werden.

Zusätzlich wurde eine **Ableitung von disziplinübergreifenden Team- und Kommunikationsstrukturen** durchgeführt. In diesem Fall wurde nicht die Struktur der Bearbeiter der Prozessschritte betrachtet, sondern die Vernetzung der Abteilungen aufgrund funktionaler Abhängigkeiten. Hierzu wurden die für die Funktionen verantwortlichen Abteilungen über die entsprechende DMM im integrierten Produkt- und Prozessmodell mit den technischen Funktionen verknüpft. Die hierfür notwendigen Informationen konnten sehr einfach aus den Verantwortungsbereichen der einzelnen Abteilungen gewonnen werden bzw. lagen bereits in der benötigten Form vor.

Aus der Verknüpfung von Funktionen mit Abteilungen sowie der Wirkungs-Funktionsstruktur, kann so die Struktur der Entwicklungsabteilungen aufgrund funktionaler Abhängigkeiten abgeleitet werden (Bild 6-7, aus Datenschutzgründen sind nicht alle Abteilungen benannt). Diese erstellte Struktur zeigt, dass über den gesamten Entwicklungsprozess gesehen ein sehr eng vernetztes Kernteam existiert, in dem die eigentliche Entwicklung des



Systems stattfindet. Darüber hinaus gibt es ein erweitertes Netzwerk von Abteilungen, welche nicht direkt an der Entwicklung beteiligt sind sondern nur indirekt darauf einwirken. Beispiele für solche Abteilungen sind das Design oder der Versuch.

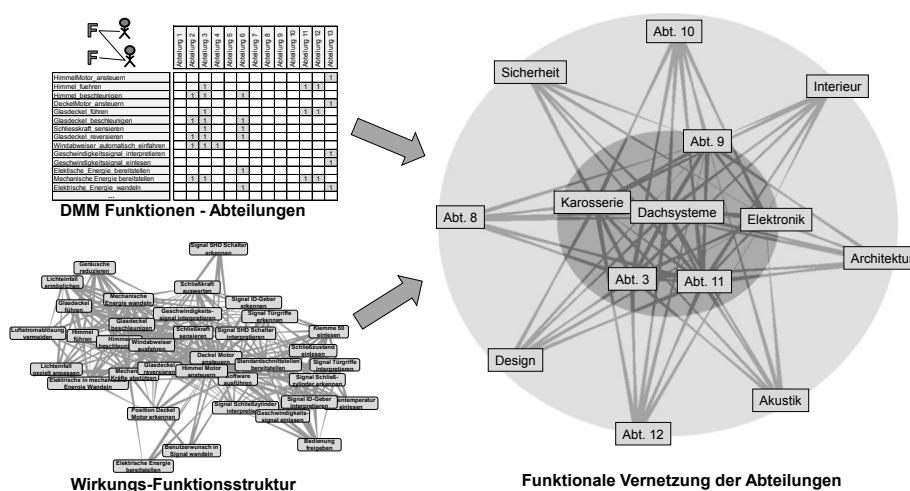


Bild 6-7: Ableitung von Teamstrukturen aufgrund funktionaler Abhängigkeiten [nach HELLENBRAND et al. 2010]

Innerhalb des Kernteams ist eine hohe Kommunikation und Abstimmung erforderlich, da eine Vielzahl von wechselseitigen Abhängigkeiten vorliegt. Die berechnete Vernetzung der Entwicklungsabteilung kann somit zur Erstellung von projektbezogenen Teams sowie zur Optimierung der Aufbauorganisation verwendet werden. Weiterhin ist auch eine phasenorientierte Analyse möglich, um in den einzelnen Entwicklungsphasen eine optimale Teamzusammensetzung zu generieren.

Es wurde außerdem die **Ableitung von Abstimmungsinhalten** in den einzelnen Prozessphasen betrachtet. Hierzu wurden auf Basis der aufgenommen Teilmatrizen (vgl. Kap. 6.1.1) die Verknüpfung von Meilensteinen mit Komponenten sowie technischen Funktionen berechnet (Bild 6-8 links). Diese zeigen sehr klar und übersichtlich, welche Funktionen bzw. Komponenten von welchem Meilenstein betroffen sind. Es ist erkennbar, dass gerade zu Beginn des Prozesses nicht alle Komponenten, wie ein Großteil der Mechanik, die Softwarekomponenten Einklemmschutz und Anti-Wummer-Steuerung, keinen Einfluss auf die Erfüllung der Meilensteine haben. Analog gilt dies für bestimmte Funktionen wie die Führung von Glasdeckel und Himmel, das Einlesen bestimmter Sensorwerte (Temperatur, Geschwindigkeit) sowie das Sensieren der Schließkraft.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse ist somit erkennbar, welche Funktionen bzw. Komponenten für aktuelle Entwicklungsphase relevant sind und es kann ein zielgerichteter Informationsaustausch stattfinden. Weiterhin können die Erkenntnisse genutzt werden, um die Ressourcen zur Bearbeitung des Entwicklungsprozesses effektiver einzusetzen (nicht sämtliche Komponenten und Funktionen müssen von Beginn an entwickelt werden) oder den Prozess insgesamt zu verkürzen. Es ist außerdem wesentlich transparenter, welche Elemente sich im Vergleich zu vorherigen Meilensteinen verändert haben oder neu hinzugekommen sind, was zur Unterstützung bei der Fehlersuche herangezogen werden kann.

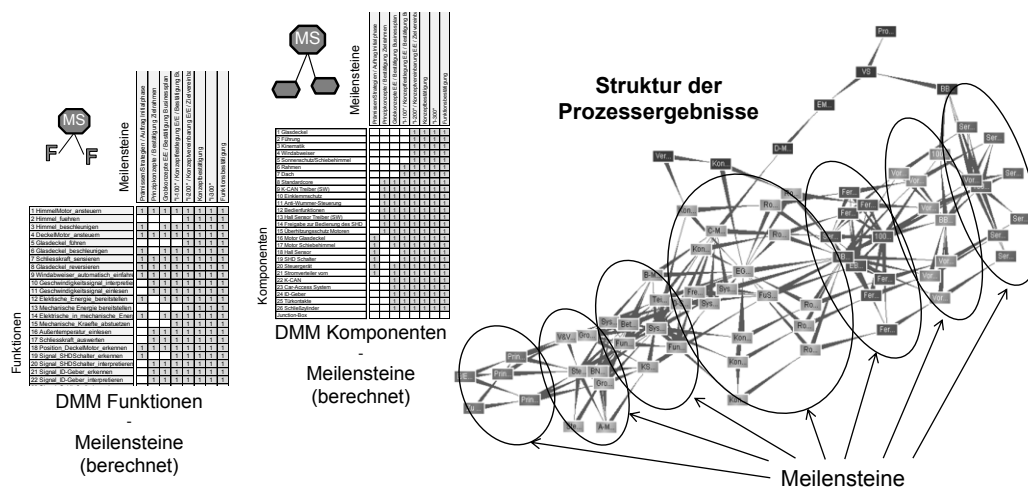


Bild 6-8: Struktur der Prozessergebnisse sowie Verknüpfung Meilensteine mit Komponenten bzw. Funktionen

Es wurde außerdem die Struktur der Prozessergebnisse analysiert (Bild 6-8 rechts). In der grafischen Repräsentation sind deutlich die Cluster zu erkennen, welche die zentralen Meilensteine widerspiegeln. Somit ist auch aus dieser Darstellung erkennbar, welche Prozessergebnisse zu welchen Meilensteinen vorliegen müssen und wie sie mit ihren Vorgängern bzw. Nachfolgern verknüpft sind. Die Struktur der Prozessergebnisse gibt gleichzeitig einen sehr guten Überblick über den disziplinübergreifenden Entwicklungsfortschritt des technischen Systems, da die Prozessergebnisse die Entwicklungsstände der Komponenten darstellen. Auf dieser Grundlage kann eine Plausibilitätsprüfung des Prozesses, das Zusammenfassen oder Einführen von Meilensteinen oder das eine neue Zuordnung von Prozessergebnissen zu Meilensteinen erfolgen.

Das Themengebiet der **Steuerung und Kontrolle des Entwicklungsprozesses** konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht anhand dieses praxisnahen Entwicklungsprojektes evaluiert werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei dem analysierten Prozess zwar um ein laufendes Projekt handelt, die zugehörigen Daten des Controllings sich jedoch auf die Vergangenheit beziehen. Ein detaillierter Einblick in den aktuellen Entwicklungsfortschritt konnte aus Geheimhaltungsgründen nicht erfolgen. Das *Konzept zur Darstellung des Entwicklungsfortschrittes* wurde stattdessen den Entwicklern in Abstimmungs- und Expertengesprächen vorgestellt (siehe Kap. 6.2.2) und *grundsätzlich positiv bewertet*.

## 6.2 Expertengespräche im wissenschaftlichen sowie industriellen Umfeld

Ein weiterer Bereich zur Evaluation der entwickelten Methodik waren Expertengespräche, Interviews und Workshops mit Wissenschaftlern aus verwandten Forschungsgebieten sowie mit Anwendern aus der Industrie. Diese Gespräche und Interviews wurden zum einen im Rahmen des Projektes MechaTUM (siehe Kap. 1.3) in Form von Expertengesprächen mit verschiedenen Abteilungen sowie durch regelmäßige Präsentationen vor einen breiten Anwen-

derkreis durchgeführt. Weiterhin wurde der entwickelte Ansatz regelmäßig auf wissenschaftlichen Konferenzen, in Workshops sowie im Rahmen eines Forschungsaufenthaltes des Autors an der University of Cambridge vorgestellt und intensiv diskutiert.

### 6.2.1 Darstellung der geführten Gespräche und Interviews

Der entwickelte Ansatz zur Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse wurde regelmäßig zur begleitenden Weiterentwicklung sowie zur Evaluation sowie auf wissenschaftlichen Konferenzen und Workshops einem breiten Publikum aus Forschung sowie interessierten Industrieteilnehmern vorgestellt. In diesem Rahmen wurde die Methodik mit dem Vorgehensmodell sowie den zugehörigen Werkzeugen und Hilfsmitteln einem breiten internationalen Publikum aus der Forschung und interessierten Industrieteilnehmern vorgestellt und intensiv diskutiert. Ebenso konnten Schwachstellen und Weiterentwicklungspotentiale identifiziert und in die weitere Entwicklung des Ansatzes aufgenommen werden.

Im wissenschaftlichen Umfeld standen die theoretischen Grundlagen der Methodik sowie ihre Durchgängigkeit und Einordnung in das wissenschaftliche Umfeld im Vordergrund der Betrachtungen. Die Schwerpunkte der Gespräche mit Industrieanwendern lagen hingegen in erster Linie auf der Anwendbarkeit und Verständlichkeit der Methodik im industriellen Alltag sowie die sinnvolle Interpretations- und Verwendbarkeit der gewonnenen Informationen zur Verbesserung der Entwicklungsprozesse. Darüber hinaus wurden in den Diskussionen mit beiden Gruppen die gewonnenen Erkenntnisse zur Weiterentwicklung und Verbesserung des Ansatzes verwendet (siehe Bild 6-9).

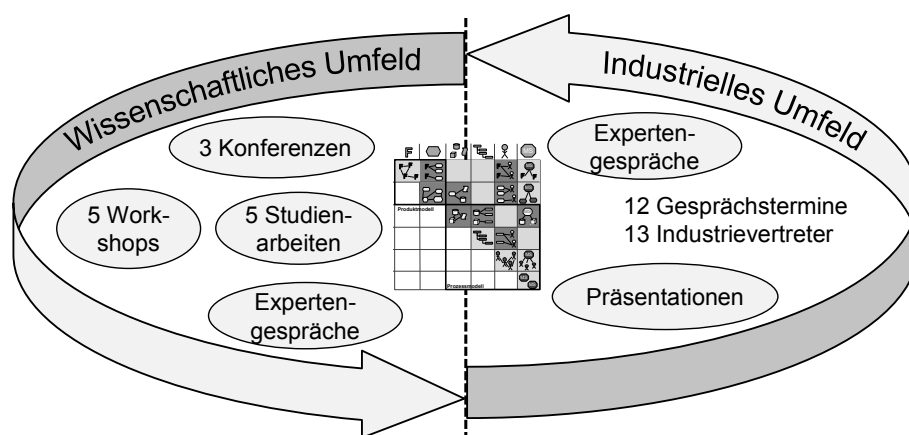


Bild 6-9: Überblick zur Evaluation der Methodik zur Prozessplanung und -synchronisation

Erste Ergebnisse zur Erfassung und Modellierung von Produktstrukturen, die Anbindung von Personen und Verantwortlichkeiten sowie die dreidimensionale Visualisierung der Systemstrukturen konnte in einem Mechatronik-Workshop im Rahmen der „**10th International Design Conference**“ (DESIGN 2008) in Dubrovnik (HR) präsentiert und diskutiert werden. Diese erste positive Bewertung des Ansatzes wurde durch die Präsentation auf dem „**Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme**“ (EMS 2010) bestätigt, auf denen

das vollständige Systemmodell sowie erste Ansätze zur Planung und Synchronisation der Entwicklungsprozesse gezeigt wurden. Die vollständige Methodik mit dem zugehörigen Rahmenwerk wurde schließlich auf der „**International Conference on Engineering Design**“ (ICED 2011) in Kopenhagen (DK) vorgestellt und zur Diskussion gestellt.

Eine weitere kritische Diskussion des entwickelten Ansatzes fand im Rahmen eines **internationalen Forschungsaufenthaltes** des Autors am Engineering Design Centre (EDC) der **University of Cambridge** (GB) im Sommer 2011 statt. Hierbei wurde die Methodik intensiv in vier Workshops und diversen Einzelgesprächen mit insgesamt **sieben der dort tätigen Wissenschaftler** aus den Bereichen *Prozess-, Projekt-, Komplexitäts-, Iterations-, und Änderungsmanagement* sowie *Lean Development* diskutiert und weiterentwickelt.

Abschließend wurde die entwickelte Methodik im Mai 2012 im Rahmen der **Forscherguppe „Prozessmanagement“** des Lehrstuhls für Produktentwicklung vorgestellt und gesamthaft diskutiert. An diesem Workshop waren **sechs wissenschaftliche Mitarbeiter** des Lehrstuhls aus den Anwendungsgebieten *Variantenmanagement, Komplexitätsmanagement, Strukturanalysen in mechatronischen Produktkonzepten und Innovationsprozessen, Prozessmanagement, Änderungsmanagement, Innovationsmanagement, offener Produktentwicklung, Lean Development, Produktpiraterie* sowie *strategische Produktplanung* beteiligt. In diesem Rahmen wurden die theoretischen Grundlagen, das Systemmodell sowie die einzelnen Schritte des Vorgehensmodells im Detail durchgegangen und auf ihre Plausibilität überprüft.

Eine weitere Bestätigung des Ansatzes findet sich durch die Aufnahme des vorgestellten Evaluationsobjektes „Schiebebedach“ als Anwendungsbeispiel in einen **begutachteten Grundlagenbuch** zur Gestaltung, Entwicklung und Management komplexer Systeme mit Hilfe von DSM und MDM [EPPINGER & BROWNING 2012]. In diesem werden der aktuelle Stand der Technik sowie diverse Beispiele aus unterschiedlichen Anwendungsszenarios dargestellt.

Neben den durchgeführten Präsentationen und Diskussionen im wissenschaftlichen Umfeld, wurden parallel dazu vor allem im Rahmen der Prozesssynthese des Projektes MechaTUM Expertengespräche und Interviews mit **Vertreten aus der Industrie** geführt. Die Ergebnisse dieser Gespräche werden im Folgenden dargestellt.

Insgesamt fanden **zwölf Expertengespräche mit dreizehn unterschiedlichen Gesprächspartnern** statt. In diesen waren pro Gespräch neben den Vertretern des Lehrstuhls maximal zwei Teilnehmer aus der Industrie gleichzeitig anwesend, so dass ausreichend Zeit für individuelle Rückfragen und Anmerkungen bestand und eine intensive Diskussion geführt werden konnte. Unter den interviewten Industrievertretern waren sowohl *Führungskräfte wie auch Sachbearbeiter* vertreten, die in den Bereichen *Prozessmanagement und -gestaltung, Entwicklung, Architektur- und Systemgestaltung, Konstruktion und Absicherung* sowohl im Bereich Mechanik wie auch in der Elektronik/Software sowie Gesamtsystem tätig waren. Parallel zu diesen Gesprächen wurde der Fortschritt im Projekt in regelmäßigen **Präsentationen einem größeren Anwenderkreis** (jeweils 8-12 Teilnehmer aus der Industrie) vorgestellt.

### 6.2.2 Ergebnisse der Expertengespräche und Interviews

Im Rahmen der **Diskussionen im wissenschaftlichen Umfeld** wurden die entwickelte Methodik zur Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischen Produktentwicklungsprozesse unter Berücksichtigung der Produktarchitektur wurde als relevant und zielführend zur *Erfüllung der identifizierten Herausforderungen* in transdisziplinären Entwicklungsprozessen bewertet. Es liegen positive Rückmeldungen zu den gewählten *Einzelementen* der Methodik, deren Zusammenwirken im entwickelten *Rahmenwerk* sowie dem verwendeten *Systemmodell* und dessen *Repräsentation und Analyse* in einem *matrixbasierten Ansatz* vor. Ebenso wurden die *konsequente Orientierung* des Entwicklungsprozesses an den zu *realisierenden Produktfunktionen* sowie die *disziplinübergreifende Erhöhung der Systemtransparenz* durch die abstrakte, disziplinunabhängige Repräsentation der Abhängigkeiten bestätigt.

Es besteht erhebliches Interesse an detaillierten Kenntnissen des Funktions- und Komponentennetzwerkes sowie deren *disziplinübergreifenden Abhängigkeiten* über die unterschiedlichen Systemgrenzen hinweg. Der *Wechsel zwischen bauteil- und funktionsorientierter Sichtweise* erleichtert die disziplinübergreifende Kommunikation, da die betreffenden Entwickler mit ihren gewohnten Modellen arbeiten können.

Weiterhin wurden die *integrierte Betrachtung von Produkt- und Prozessstrukturen* zur *Prozessplanung* und zur *Analyse von Änderungsabhängigkeiten* als zielführend angesehen. Speziell die *Auswirkungen von Änderungen im Produkt auf den Entwicklungsprozess* sowie die *betreffenden Personen* sind aktuell häufig unbekannt. Generell wurde das sehr *systematische, strukturierte und analytische Vorgehen* der Methodik hervorgehoben, welches auch als Grundlage und zur *Dokumentation von Entscheidungen* im Prozess verwendet werden kann.

Neben diesen Grundlagen wurden die verwendete *disziplinübergreifenden Modellierung* sowie die darin enthaltenen Analysemöglichkeiten, insbesondere die *Ableitung indirekter Abhängigkeiten*, positiv bewertet. Der Ansatz trägt somit insgesamt zur *Steigerung des Systemverständnisses* und der *disziplinübergreifenden Abhängigkeiten* bei, die zu einer *verbesserten Kommunikation und Zusammenarbeit* der unterschiedlichen Abteilungen bzw. Disziplinen führt. Hierbei wurden vor allem die intuitiv verständlichen Darstellungen mit *zweidimensionalen Graphen* sowie die *dreidimensionale Visualisierung* hervorgehoben. Außerdem wurden *Flexibilität und Anpassbarkeit* der Modellierung in Bezug auf Betrachtungsgegenstand und Detaillierungsgrad positiv bewertet.

In den geführten Diskussionen konnten weiterhin verschiedene **kritische Punkte** identifiziert und in die **Weiterentwicklung der Methodik** eingebracht werden. Diese bezogen sich unter anderem auf Ergänzungen zu den theoretischen Grundlagen sowie auf die *Wieder- und Weiterverwendbarkeit* erstellter Modelle. Diese besitzen erheblichen Einfluss auf den Modellierungsaufwand und damit auf die *Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit* des Ansatzes.

Eine hiermit verbundene Fragestellung für weitere Forschungsarbeiten ist die *Identifikation von fixen und variablen Bereichen in der Produktarchitektur* sowie deren Einfluss auf die Struktur und Planbarkeit des Entwicklungsprozesses. Eng damit verknüpft sind die dynamische Veränderung der Modelle über der Zeit durch Einfügen, Wegfall oder Veränderung von Elementen in einzelnen oder mehreren Teilmodellen. Dies umfasst ebenfalls den Umgang bzw. die Integration von Iterationen im Prozess sowie den geeigneten Abstraktionsgrad der

unterschiedlichen Teilmodelle. Außerdem wurden die Verfügbarkeit bzw. Beschaffbarkeit der notwendigen Informationen sowie der verwendete Funktionsbegriff diskutiert.

Als weitere Punkte zur Verbesserung wurden der *Aufwand zur Erstellung und Überprüfung* des MDM-basierten Modells sowie die grundsätzlichen *Schwierigkeiten im Umgang mit den unterschiedlichen (Teil-)Matrizen* in einem praxisnahen Anwendungsumfeld genannt. Hieraus wurde die *Notwendigkeit einer Softwareunterstützung* abgeleitet, in der im Idealfall eine direkte Manipulation der Matrizen nicht bzw. nur sehr begrenzt erforderlich ist. Weiterhin wurden aufgrund der Komplexität der Methodik sowie zur Verdeutlichung der Vorteile die Hinterlegung eines *Leitfadens mit einem Standardvorgehen* sowie die *Integration von praxisnahem (Best Practice) Beispielen* zur Verbesserung des Verständnisses genannt.

In den **Gesprächen wurde mit der Industrie** wurde ebenfalls die *grundsätzliche Richtigkeit* des Ansatzes sowie dessen *Anwendbarkeit in einem industriellen Umfeld* von den Befragten *bestätigt*. Die Interviewpartner gaben an, dass die *zentralen Probleme in der transdisziplinären Entwicklung adressiert* werden und die entwickelte Methodik einen *Beitrag zur Verbesserung der Entwicklungsprozesse* darstellt. Diese laufen in der Praxis häufig unstrukturiert ab und die Synchronisation wird lediglich durch die Erfahrung der involvierten Mitarbeiter erreicht. Eine Ursache hierfür sind die teilweise erheblichen Abweichungen zwischen beschriebenen Soll- und den gelebten Ist-Prozessen. Eine detaillierte Prozessplanung findet erst in späteren Phasen statt, eine Verlagerung in frühere Phasen wird jedoch als sinnvoll und notwendig angesehen. Ebenso existieren in den Disziplinen unterschiedliche Beschreibungen der Entwicklungsstände („Reifegrade“), die dazu führen, dass funktionsabprüfende Tests aufgrund unterschiedlicher oder inkompatibler Arbeitsstände fehlschlagen oder nicht durchgeführt werden können. Der entwickelte Ansatz *expliziert nach Meinung der Befragten vorhandene Vorgehensweisen und Methoden und entwickelt diese weiter*. Aus theoretischer Perspektive kann er somit gut in die vorhandenen Prozesse integriert werden.

Weiterhin wurden *zentrale zugrunde gelegte Sichtweisen* wie das gewählte *Funktionsverständnis* und die daraus resultierende *funktionsorientierte Gestaltung der Prozesse* bestätigt. Der hierarchische Ansatz ausgehend von Kundenfunktionen zu technischen Funktionen ist mit den Vorstellungen in der Industrie vereinbar. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass der Funktionsbegriff in verschiedenen Abteilungen bzw. Disziplinen oftmals unterschiedlich besetzt ist und teilweise eine Vermischung mit Produkteigenschaften vorliegt. Es besteht somit Bedarf nach einer *einheitlichen, disziplinübergreifenden Sichtweise*, wozu der entwickelte Ansatz einen Beitrag leistet. In ähnlicher Weise sorgte der in frühen Gesprächen verwendete Begriff „Domäne“ für Verständnisschwierigkeiten bei den Industrievertretern, so dass in Folge ausschließlich von Disziplinen gesprochen wurde. Die Vorteile der Methodik müssen auch nach Meinung der Industrievertreter durch ein *Standardvorgehen* sowie anschauliche *Best-Practice Beispiele* den Mitarbeitern nahegebracht werden.

Die Modellierung mit MDMs, die einerseits als Vorteil und Stärke des Ansatzes bewertet wurde, stellt gleichzeitig einen Punkt für Kritik dar. Es wurden die notwendige *Einarbeitungszeit* sowie der *wenig intuitive Umgang* mit den teilweise sehr umfangreichen Matrizen als negative Aspekte angeführt. Weiterhin wurde der *Aufwand zur Erstellung und Überprüfung* der Matrizen kritisch hinterfragt. Diese Aspekte konnten durch die oben Visualisierungsmöglichkeiten teilweise abgeschwächt werden, bestätigen jedoch die *Notwendigkeit eines*

*Tools* mit intuitiv verständlicher Oberfläche und Schnittstellen zu den vorhandenen PDM/PLM-Systemen zur (teil-)automatisierten Ableitung der Matrizen. Die Einführung eines *Tools* wurde jedoch teilweise kritisch bewertet, da sich schon sehr viele unterschiedliche *Tools* im Einsatz befinden. Daher sollte den operativ tätigen Entwicklern lediglich die aufbereiteten Informationen zur Verfügung gestellt werden. Der Einsatz eines zusätzlichen *Tools* solle auf Prozessspezialisten bzw. Führungskräfte beschränkt sein. Der Aufwand zur *Einarbeitung in die Modellierung* wurde als noch *vertretbar und angemessen* eingeschätzt. Dies wurde durch die Erfahrungen des Autors in den Interviews mit der Industrie bestätigt, in denen die Grundzüge der Methodik auch „unerfahrenen“ Gesprächspartnern sehr gut innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit nahegebracht werden konnten. Diese kritischen Anmerkungen bekräftigen die Forderung mehrerer Gesprächspartner, die Vorteile des Ansatzes (Erkenntnisgewinn, zusätzlichen Informationen) durch ein nachvollziehbares *Standardvorgehen* sowie *anschauliche Beispiele* den Mitarbeitern nahe zu bringen um diese zu überzeugen.

Es wurden auch hier zahlreiche **Anregungen bzw. Optimierungsvorschläge** geäußert, die soweit möglich in den Ansatz integriert wurden. So wurde bereits in einer frühen Phase des Projektes angemerkt, dass eine *Trennung von Verantwortlichen und Bearbeitern für Funktionen und Bauteile* erforderlich ist. Dieses wurde in der Modellierung berücksichtigt, so dass unterschiedliche Verknüpfungen mit unterschiedlichen Personen möglich sind. Ein weiterer Punkt bezog sich auf die *Verwendung einzelner Komponenten in mehreren Baureihen*. Dieser Aspekt wurde in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet, da das Multiprojektmanagement bewusst ausgeklammert wurde. Weiterhin wurde angemerkt, dass bestimmte *Teilfunktionen in mehreren Kundenfunktionen* verwendet werden und ihre Wirkung berücksichtigt werden muss. Dies ist über die Verknüpfung von Teilfunktionen mit mehreren Kundenfunktionen in der Modellierung ebenfalls realisiert. Ein weiterer Punkt betraf die *Integration* der entwickelten Methodik in die *bestehenden Prozesse und Abläufe* eines Unternehmens, woraus sich neue Problemstellungen und Herausforderungen ergeben. So ist beispielsweise eine funktionale Freigabe bisher nur indirekt vorhanden. Formal läuft der Prozess bauteilorientiert über die Freigabe von Zeichnungen in den PDM/PLM-Systemen ab. Die erfolgreiche Implementierung von Prozessen und Methoden stellt jedoch ein eigenständiges Aufgabengebiet dar und war nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

Als ein **Fazit der Gespräche in der Industrie** lässt sich festhalten, dass primär die deskriptiven Aspekte des Ansatzes als sehr gut bewertet und aufgenommen wurden. Die systematische Erfassung, Analyse und transparente Darstellung von direkten und indirekten Entwicklungsabhängigkeiten wird als erhebliches Potential zur Verbesserung der bestehenden Prozesse angesehen. Die Ansätze zur Prozessplanung (präskriptiver Teil) wurden hingegen kritischer betrachtet, wobei auch hier die grundsätzliche Richtigkeit des Vorgehens bestätigt wurde.

Zum **weiteren Vorgehen bzw. als weiterführende Wünsche und Anregungen** wurden übergreifend in beiden Gruppen die *Integration der Zeitdauern von Integrations- und Absicherungsaktivitäten* geäußert. Aus dem bestehenden strukturellen Ansatz können lediglich die Auswirkungen von Aktivitäten auf Funktionen bzw. Komponenten abgebildet werden. Es sollte stärker berücksichtigt werden, dass die Entwicklung während der Absicherungsaktivitäten weiterläuft und die Komponenten zu späteren Zeitpunkt bereits einen andere Zustand besitzen können. Dies trifft jedoch auf den gesamten Ansatz zu, da aktuell auch in den Prozess-

schritten keine Zeitdauern hinterlegt sind. Ein Ansatz zur Modellierung von Zeitdauern sowie die Ableitung von Ablaufplänen wurden in Kap. 5.6 gezeigt

Zusätzlich sollte die weiter *zunehmende Vernetzung der Systeme und die Zunahme der Mechatronik* bzw. transdisziplinärer Systeme allgemein berücksichtigt werden. Damit entstehen weitere Herausforderungen, die über die reine Betrachtung der strukturellen Vernetzung hinausgehen. So stellen sich beispielsweise Fragen nach einer übergreifenden Methodik zur Konzeptbewertung mit Schwerpunkt in sehr frühen Entwicklungsphasen. Hierbei sind vor allem die *Identifikation kritischer Schnittstellen und Funktionen sowie der Stellhebel* (Kern des Konzeptes, Kritikalität, Robustheit) von Interesse. Weiterführend besteht Bedarf nach einer *Methodik zur transdisziplinären Auslegung mechatronischer Systeme*. Dies könnte beispielsweise über die Kopplung von Simulationsmodellen geschehen, deren Informationen aus den Strukturbetrachtungen gewonnen werden können.

Ein weiterer Punkt war ein Ausbau des Themas *Reifegrade* und Darstellung von Reifegraden in der Entwicklung. Gerade im industriellen Umfeld besteht bei Führungskräften ein Bedarf, den aktuellen Stand eines Projekts bzw. einzelner Komponenten oder Funktionen in einem kurzen Überblick zu erfassen. Die hiermit verbundene Problematik wurde in Kap. 5.8.1 diskutiert. Unabhängig von der Aussagekraft und dem Mehrwert einer solchen Kennzahl ist dieses Thema zu weitreichend für die vorliegende Arbeit und wurde daher ausgespart. Einige Möglichkeiten zur Berechnung und Darstellung von *Reifegraden auf Basis von Funktionen, Prozessergebnissen und Prozessschritten* mit Hilfe des entwickelten Modells wurden *diskutiert und positiv bewertet*.

Von Seiten der Industrie wurde in mehreren Gesprächen der Wunsch nach *einheitlichen und „optimalen“ Prozessen* für die Entwicklung geäußert. Diese Forderung lässt sich allgemeingültig nicht umsetzen, da eine Optimalform von Prozessen für alle Anwendungsfälle nicht existiert (vgl. Kap. 2.3). Aufgrund der hohen Wiederholtätigkeit und der hohen Ähnlichkeit der Produkte in Serienentwicklungsprozessen von einer Generation zur nächsten lässt sich dies eventuell in Teilen realisieren. Dies passt zu den Forderungen, generische Methoden zur Ableitung bzw. zur Gestaltung des *Übergangs von Produktarchitektur zur Prozessstruktur* zu ermöglichen. Dies geschieht bisher meist aus Anpassung der Vorgängerprozesse. Hieraus sollen „neuartige“ Prozesse für die *Zusammenführung von Mechanik und Elektronik/Software* abgeleitet werden.

Letzter Punkt war die *Institutionalisierung bzw. Integration* des entwickelten Ansatzes in die bestehenden Prozesse und Abläufe des Unternehmens. Hier bestehen Herausforderungen in Bezug auf die Akzeptanz sowie die Sicherstellung der Durchführung der Prozesse. Die erfolgreiche Implementierung von Methoden und Prozessen stellt jedoch ebenfalls ein eigenes Aufgabengebiet mit unterschiedlichen Herausforderungen und Ansätzen dar und war nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

Zusammenfassend konnte mit Hilfe der durchgeführten Präsentationen, Expertengespräche und intensiven Diskussionen eine positive Bewertung des Ansatzes sowie seine grundsätzliche Wirksamkeit von einem breiten Publikum aus Wissenschaft und Industrie herbeigeführt werden. Weiterhin wurden noch weitere Anregungen und Weiterentwicklungspotentiale identifiziert. Diese Ergebnisse werden, ergänzt um weitere Punkte, gesammelt im Ausblick des nächsten Kapitels dargestellt.



### 6.3 Beurteilung hinsichtlich der gestellten Anforderungen

Die aus den in den vorherigen Teilkapiteln dargestellten Expertengesprächen, Diskussionen und Rückmeldungen zur entwickelten Methodik gewonnenen Erfahrungen bilden die Grundlage für die vorgenommene Bewertung. Das Kapitel ist entsprechend den Kategorien der Anforderungssammlung (siehe Kap. 4.1) in die Abschnitte grundlegende Anforderungen, inhaltliche Anforderungen an die Unterstützung sowie Anforderungen die Modellierung untergliedert. Es wird an dieser Stelle lediglich ein Überblick der Bewertungsergebnisse in den einzelnen Kategorien gegeben. Dabei wird vor allem auf Gründe für das nicht vollständige Erreichen von Anforderungen eingegangen.

Die Bewertung der Anforderung erfolgte nach einem einfachen dreistufigen Bewertungsschema (erfüllt / teilweise erfüllt / nicht erfüllt bzw. nicht adressiert). In Bild 6-10 ist das Ergebnis der Anforderungsbewertung aufgeschlüsselt nach den erstellten Bereichen sowie bezogen auf die gesamte Methodik dargestellt. Die detaillierte Übersicht der Bewertung jeder gestellten Anforderung ist im Anhang Kap. 9.5 zu finden.

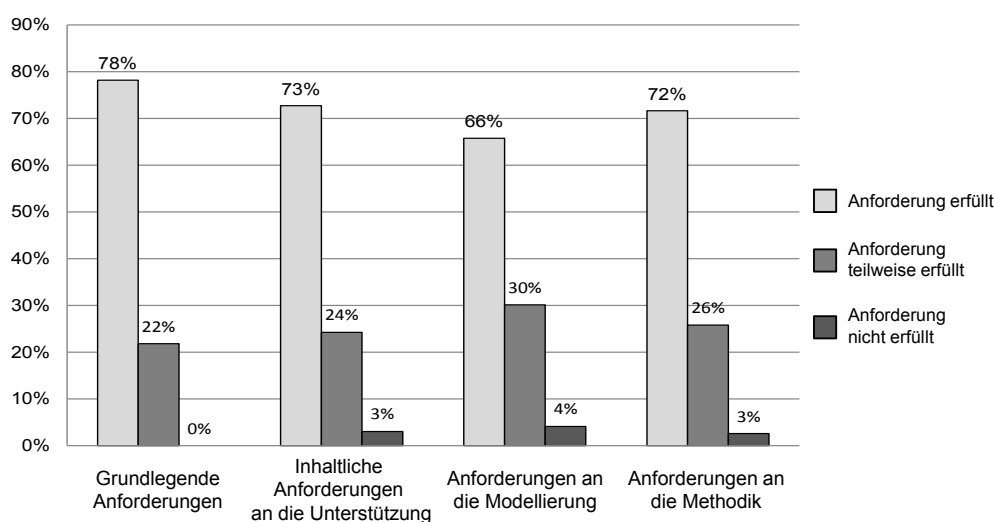


Bild 6-10: Übersicht der Anforderungserfüllung nach Bereichen

Im Bereich der **grundlegenden Anforderungen** konnte ein hoher Erfüllungsgrad erreicht werden. Mit dem entwickelten Ansatz steht eine Methodik zur funktionsorientierten Modellierung, Planung, Analyse und Steuerung mechatronischer Entwicklungsprozesse zur Verfügung. Diese ermöglicht durch die integrative Betrachtung von Wirk- und Änderungsabhängigkeiten in Produkt und Prozess eine transdisziplinäre Planung des Prozesses und trägt zur Erhöhung des Systemverständnisses bei. Somit wird eine effektive Synchronisation der Disziplinen ermöglicht und die Grundlage für ein disziplinübergreifendes Änderungsmanagement geschaffen.

Eine nicht vollständige Zielerreichung muss in Bezug auf Verminderung von Iterationen festgestellt werden. Diese werden lediglich auf Makroebene betrachtet und nicht bis auf die operative Arbeitsebene abgebildet. Ebenso konnte die Steigerung von Effektivität und Effizienz

nur theoretisch gezeigt sowie von Experten bestätigt werden. Ein Nachweis anhand der Beobachtung eines realen Entwicklungsprojektes konnte aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

Ein weiterer Punkt betrifft die Anwendbarkeit in sämtlichen Prozessphasen. Da die Produktplanung auf Basis des Produktkonzeptes erfolgt, können die frühen Phasen der Konzeptionierung nicht unterstützt werden. Die Konzeptionierung der einzelnen Komponenten hingegen wird unterstützt.

Ferner müssen Einschränkungen in Bezug auf die Akzeptanz sowie die Einfachheit der Anwendung der Methodik hingenommen werden, da in jedem Fall eine Einarbeitung in die verwendete Modellierung erforderlich ist. Diese ist auch Ursache für die nicht uneingeschränkte Flexibilität und Anpassbarkeit an unterschiedliche Randbedingungen sowie Änderungen im Prozessverlauf. Diese sind grundsätzlich vorgesehen und möglich, jedoch kann aufgrund der Vielzahl von Relationen ein hoher Aufwand erforderlich sein.

Ein letzter Punkt ist die softwaretechnische Unterstützung der Methodik. Die Unterstützung des Ansatzes ist aufgrund der einfachen Darstellbarkeit des matrixbasierten Modells in einem Rechner sehr gut möglich. Eine Implementierung ist bisher nicht erfolgt, da der Fokus auf der Entwicklung der Methodik lag.

Eine ebenso positive Bewertung kann bezüglich **inhaltlicher Anforderungen an die Unterstützung** getroffen werden. Das enthaltene *Vorgehensmodell* erlaubt eine durchgängige und verständliche Beschreibung der einzelnen Schritte zur Modellierung, Planung, Analyse und Steuerung mechatronischer Entwicklungsprozesse. Diese verknüpft die in unterschiedlichen Modulen bereitgestellten Methoden und Hilfsmittel zur Durchführung der einzelnen Schritte. Es bietet somit ein Standardvorgehen für unerfahrene Entwickler. Gleichzeitig bietet der modulare Aufbau eine hohe Flexibilität für erfahrende Anwender.

Es müssen auch hier gewisse Abstriche hinsichtlich der Verständlichkeit sowie der einfachen Handhabbarkeit des Ansatzes hingenommen werden. Dies ist wiederum auf die Notwendigkeit der Einarbeitung in die matrixbasierte Modellierung sowie die darauf basierende Analyse von Strukturmerkmalen zurückzuführen. Weiterhin besteht noch Handlungsbedarf bezüglich Unterstützung in der Findung eines optimalen Detaillierungsgrades sowie der strukturierten Speicherung von Prozess- und Erfahrungswissen.

Das entwickelte Vorgehen zur *Unterstützung der Planung* erlaubt eine funktionsorientierte und domänenübergreifende Planung des Entwicklungsprozesses unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten in der Produktarchitektur. Es basiert auf der Analyse disziplinübergreifender Strukturmerkmalen und -charakteristika in der Produktstruktur und ermöglicht die Ableitung der Struktur eines synchronisierten mechatronischen Entwicklungsprozesses.

Die Methoden zur Prozessplanung ermöglichen die Ableitung der Prozessstruktur sowie deren Visualisierung. Die Darstellung der zeitlichen Komponente ist jedoch nicht direkt möglich, so dass auf zusätzliche Darstellungsformen zurückgegriffen werden muss. Weiterhin werden in der Planung aktuell nur wenige Eigenschaften der Struktur berücksichtigt, so dass hier noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Ebenso können die Auswirkungen von spezifischen Strukturmerkmalen auf den Entwicklungsprozess noch detaillierter untersucht werden, um daraus Handlungsempfehlungen für die Konzeptionierung abzuleiten.

Aufgrund des verwendeten Abstraktionsgrades der Prozessschritte können Iterationen auf operativer Ebene nicht abgebildet und somit nicht aktiv vermindert werden. Aufgrund der Synchronisation zwischen den Disziplinen ist jedoch auf dieser Ebene ein Rückgang zu erwarten. Die Erkennung von potentiellen Iterationstreibern aus der Struktur sowie Ansätze zu deren Verkürzung konnten in Folge nicht umgesetzt werden.

Die Festlegung des Reifegradverlaufs ist aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich der Reifegradmodellierung (siehe unten) nur bedingt möglich. Der geplante Sollprozess eignet sich somit grundsätzlich für die Prozesssteuerung, es besteht jedoch noch weiterer Handlungsbedarf.

Die *Unterstützung der Synchronisation* erfolgt ebenfalls auf Basis des integrierten Produkt- und Prozessmodells und ermöglicht die disziplinübergreifende Analyse und Darstellung von Wirk- und Änderungsabhängigkeiten. Dies führt zu einem verbesserten Verständnis über die Abhängigkeiten von Produkt- und Prozessstruktur, dient zur Unterstützung von Entscheidungen und ermöglicht somit die entwicklungsbegleitende Synchronisierung der Disziplinen.

Die bereits genannte Thematik der einfachen Anpassbarkeit bzw. Erweiterbarkeit des Ansatzes hinsichtlich geänderter Randbedingungen ist aufgrund der gemeinsamen Modellierung auch hier vorhanden. Ebenso können die Steigerung von Effizienz und Effektivität aufgrund der langen Prozessdauer nicht anhand eines Entwicklungsprozesses in der Praxis nachgewiesen werden.

Da die *Reifegradmodellierung und -darstellung* nur grundlegend integriert werden konnte und kein vollständiges Reifegradsystem mechatronischer Produkte vorliegt, ist auch die Abbildung des aktuellen Entwicklungsstandes nur eingeschränkt möglich. Insbesondere die Thematik der frühzeitigen Erkennung von Risiken sowie die Ableitung entsprechender Maßnahmen konnte nicht umgesetzt werden.

In Bezug auf die Bewertung der **Anforderungen an die Modellierung** ist ein gemischtes Fazit zu ziehen, da die gewählte Modellierungsform wesentliche Vorteile bietet, gleichzeitig jedoch einige inhärente Nachteile in Kauf genommen werden müssen. Zum einen ermöglicht das Systemmodell auf Basis einer Multiple-Domain Matrix die disziplinunabhängige Abbildung unter Berücksichtigung unterschiedliche Element- und Relationsarten. Es erlaubt die flexible Vernetzung von Produkt- und Prozessstrukturen in einem integrierten Modell sowie den einfachen Wechsel zwischen unterschiedlichen Perspektiven. Durch die Möglichkeit zur Anwendung von Strukturanalysen können disziplinübergreifende Abhängigkeiten identifiziert und diese für die Prozessplanung sowie die entwicklungsbegleitende Synchronisation und Steuerung verwendet werden.

Zum anderen bestehen, wie bereits in Kap. 5.6.2 angesprochen, bestimmte Einschränkungen in der Berücksichtigung des Modellierungs- und Änderungsaufwandes. Grundsätzlich sind die Möglichkeiten zur kontinuierlichen Anpassung und Veränderung des Systems vorhanden, jedoch ist damit zumeist aufgrund der Vielzahl von Abhängigkeiten ein hoher Aufwand verbunden. Die Dokumentation von Entscheidungen ist somit auch nur eingeschränkt möglich, da hierfür ein aufwendiger Modellvergleich bzgl. der Alternativen erforderlich ist. Anwenderbezogenes Prozesswissen nur sehr abstrakt sowie die Gründe für bestimmte Prozessabläufe sind ebenfalls nicht erkennbar.

Die Sicherstellung von Redundanzfreiheit bzw. Konsistenz der Abhängigkeiten ist ebenfalls nicht automatisch gegeben und erfordert eine manuelle Überprüfung. Dies ist zum einen auf die Existenz weiterer parallel verwendeter Entwicklungssysteme zurückzuführen, zum anderen auf die fehlende Unterscheidung von Relationsarten sowie die Verwendung von qualitativen Abhängigkeiten. Dennoch führt die Modellierung zu einer Verbesserung der Konsistenz disziplinübergreifender Abhängigkeiten.

Die Modellierung erlaubt die Zuweisung von Eigenschaften zu Elementen und Relationen. Dies wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht vorgesehen. Die gleichzeitige Abbildung von hierarchischen und nichthierarchischen Beziehungen konnte aufgrund fehlender methodischer Grundlagen ebenso nicht umgesetzt werden.

In Bezug auf die Unterstützung des Prozesscontrollings konnte nur die grundsätzliche Eignung gezeigt werden. Es besteht die Möglichkeit zur Erfassung des Entwicklungsfortschrittes in Bezug auf verschiedene Reifegradindikatoren (Funktionen, Prozessergebnisse, Prozessschritte), jedoch konnte ein vollständiges Reifegradsystem für mechatronische Produkte unter Einbeziehung der Vernetzungen nicht umgesetzt werden. Eine Anknüpfung von zeitlichen Aussagen zur Behebung einer Zielabweichung ist unter Einbeziehung terminorientierter Modelle sowie Expertenwissen möglich.

Die Verständlichkeit und Erfassbarkeit des Systems ist bei großen Modellen nur eingeschränkt gegeben. Es besteht grundsätzlich mit der zwei- und dreidimensionalen grafischen Darstellung eine transparente und domänenübergreifend verständliche Form der Visualisierung, jedoch geht die Übersichtlichkeit bei sehr großen Systemen zurück. Ebenso bietet die Visualisierung von domänenübergreifenden Abhängigkeiten weiteres Verbesserungspotential.

Eine Vielzahl der genannten Einschränkungen zur Modellierung sind auf grundsätzliche Nachteile und Schwächen matrixbasierter Methoden zurückzuführen (siehe hierzu auch Kap. 5.5.1 sowie [BROWNING 2001, S.301F; KREIMEYER 2010, S. 53F]). Mit Hilfe einer geeigneten Rechnerunterstützung, die in dieser Arbeit nicht implementiert wurde, können sie zum Großteil erheblich abgemindert bzw. vollständig behoben werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die zentralen Anforderungen an die transdisziplinäre Prozessplanung und -synchronisation mit dem entwickelten Ansatz erreicht werden konnten. In einigen Bereichen konnte lediglich eine Teilerfüllung der gestellten Anforderungen erzielt werden, so dass hier zusätzlicher Forschungsbedarf besteht. Diese beziehen sich vor allem auf die Modellierung von Reifegraden, den Umgang mit dynamischen Änderungen, die transparente Visualisierung der Strukturen sowie die Rechnerunterstützung.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

*In diesem Kapitel werden, ausgehend von der bearbeiteten Problemstellung, die Zielsetzung, das durchgeführte Vorgehen sowie die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Im Anschluss werden offene Punkte und Weiterentwicklungspotenziale aufgezeigt sowie ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungs- und alternative Anwendungsfelder gegeben.*

### 7.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Mechatronik hat seit Jahren einen stetig wachsenden Einfluss auf die Produkte der Industrie sowie des Alltags. Das integrative Zusammenwirken der Disziplinen eröffnet eine Vielzahl von Vorteilen wie beispielsweise einen gesteigerten Funktionsumfang. Gleichzeitig steigt die Komplexität dieser Produkte, da die Funktionalität nur im definierten Zusammenwirken der unterschiedlichen Funktionen und Komponenten realisiert werden kann.

Die Entwicklung mechatronischer Produkte erfordert somit die zielgerichtete und effektive Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen. Dies führt, im Vergleich zu herkömmlichen Produkten, neben der höheren Produktkomplexität ebenfalls zu einer Steigerung der Komplexität in den Entwicklungsprozessen. Um den sich aus der transdisziplinären Zusammenarbeit ergebenden Herausforderungen zu begegnen, wurden zahlreiche Vorgehensmodelle, Methoden und Hilfsmittel zur Unterstützung der Entwicklungsprozesse entwickelt.

In der Prozessunterstützung konzentrieren sich die vorhandenen Ansätze vor allem auf die frühen Entwicklungsphasen, insbesondere den disziplinübergreifenden Systementwurf. Die hohe Integrationsdichte sowie die transdisziplinäre Vernetzung der Disziplinen sowohl auf Funktions- wie auch Komponentenebene erfordert eine methodische Unterstützung über alle Phasen des Entwicklungsprozesses hinweg. Diese wird im domänenspezifischen Entwurf sowie der anschließenden Systemintegration bisher nicht ausreichend berücksichtigt.

Zum Abschluss des domänenübergreifenden Systementwurfs liegt ein disziplinübergreifendes Produktkonzept für das mechatronische System vor. Dieses besteht aus Komponenten der unterschiedlichen Disziplinen, die in einem definierten Zusammenwirken die angestrebte Funktionalität erbringen. Diese Komponenten werden im domänenspezifischen Entwurf vollständig spezifiziert und in der Integrationsphase zu einem Gesamtprodukt zusammengefügt.

In diesen Entwicklungsphasen nutzen die Disziplinen ihre spezifischen Vorgehensmodelle und Werkzeuge zu Konkretisierung der Komponenten. Daher ist eine zeitliche und inhaltliche Synchronisation dieser disziplinspezifischen Prozesse erforderlich, um eine effektive und effiziente Zusammenarbeit im Gesamtentwicklungsprozess zu erreichen. Diese transdisziplinäre Synchronisation ist häufig nicht ausreichend ausgeprägt, so dass verstärkt Probleme in der anschließenden Integrationsphase auftreten.

Um eine Synchronisation zu ermöglichen, benötigen die Entwickler Kenntnisse über disziplinübergreifende Wirk- und Änderungsabhängigkeiten in der Produktarchitektur sowie den Entwicklungsprozessen, damit sie diese in ihren disziplinspezifischen Entwicklungen berücksichtigen können. Auf Basis des durch eine integrative Produkt- und Prozessbetrachtung er-

höhten Systemverständnisses, können Abstimmungs- und Integrationszeitpunkte sowie die Zusammensetzung von Teams und Besprechungen disziplinübergreifend aufeinander abgestimmt werden. Ferner sollen die disziplinübergreifenden Abhängigkeiten im Produkt schon bei der Planung des transdisziplinären Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist somit die Unterstützung der transdisziplinären Planung sowie der entwicklungsbegleitenden Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse. Die Unterstützung soll eine funktionsorientierte Entwicklung unter Berücksichtigung von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten in der Produktarchitektur ermöglichen und gleichzeitig zu einem erhöhten Systemverständnis beitragen.

## 7.2 Vorgehen und Ergebnisse

Zur Identifikation von Problemen und Herausforderungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte und als Grundlage für den zu entwickelnden Ansatz, wurden zunächst **zwei fragebogen- bzw. interviewbasierte Studien** in der Industrie betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vielzahl von Problemen im transdisziplinären Entwicklungsprozess auf mangelndes Systemverständnis bezüglich disziplinübergreifender Abhängigkeit in Produkt und Prozess sowie fehlende Kommunikation und Abstimmung zurückzuführen sind. Es bestehen unterschiedliche Vorgehensweise und Begriffswelten, die einer verbesserten Zusammenarbeit der Disziplinen entgegenstehen. Die aktuell verwendeten Methoden und Werkzeuge sind häufig nicht zur Beherrschung der hohen Komplexität geeignet, da sie nicht die Schaffung eines transdisziplinären Systemverständnisses unterstützen. Daraus leitet sich die Forderung nach einer integrativen Betrachtung von Produkt und Entwicklungsprozess ab.

Zur Vertiefung dieser identifizierten Herausforderungen wurde eine umfangreiche **Literaturrecherche zum Stand der Forschung und Technik** durchgeführt. Diese war entsprechend der relevanten Themengebiete in die Bereiche „Entwicklung mechatronischer Produkte“, Systemdenken und Systems Engineering“, „Komplexitätsmanagement“ sowie „Prozess- und Projektmanagement“ untergliedert. In diesem Rahmen wurde auch eine **vergleichende Betrachtung von Systems Engineering und integrierter Produktentwicklung** durchgeführt sowie die Übertragbarkeit von Vorgehensmodellen und Methoden diskutiert.

Aufbauend auf den Literaturrecherchen sowie den Ergebnissen der betrachteten Studien wurden **Anforderungen** an den Ansatz zur Unterstützung mechatronischer Entwicklungsprozesse abgeleitet. Diese wurden nach Kategorien gegliedert und in entsprechenden Anforderungslisten zusammengefasst. Sie wurden weiterhin zur Bewertung des Ansatzes verwendet.

Den Kern der vorliegenden Arbeit bildet die Entwicklung einer **Methodik zur transdisziplinären Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse**. Diese umfasst ein generisches Vorgehensmodell sowie zugehörige Methoden und Werkzeuge zur Modellierung, Planung, Analyse und Steuerung mechatronischer Entwicklungsprozesse und stellt diese in entsprechenden Modulen bereit.

Der Methodik liegt ein **Vorgehensmodell** zugrunde, welches insgesamt zwölf Schritte umfasst. In diesem wird ausgehend von einem Produktkonzept die Modellierung des technischen Produktes, des Produktentwicklungsprozesses sowie deren Verknüpfung beschrieben. Dieses integrierte Systemmodell bildet die Basis für die Planung, Analyse und Steuerung des Ent-

wicklungsprozesses. Auf Basis der Produktarchitektur kann zunächst eine präskriptive Planung des Prozesses erfolgen. Im Verlauf der Prozessdurchführung können disziplinübergreifende Abhängigkeiten in Produkt- und Prozessstruktur analysiert und transparent dargestellt werden, um so die Synchronisation der Disziplinen effektiv zu unterstützen. Weiterhin kann im Vergleich mit dem geplanten Entwicklungsprozesses der Projektfortschritt in Bezug auf unterschiedliche Reifeindikatoren ermittelt werden. Diese Informationen können als Eingangsgrößen in die Prozesssteuerung zur Ableitung von Anpassungen im Ablauf verwendet werden.

Zur Unterstützung der einzelnen Schritte des Vorgehensmodells wurden entsprechende Methoden und Hilfsmittel entwickelt, die in **Modulen** zusammengefasst sind. Durch diesen modularen Aufbau ist das Vorgehen flexibel an bestehende Randbedingungen sowie die betrachtete Fragestellung anpassbar.

Zur **Modellierung** der sozio-technischen Systems der mechatronischen Produktentwicklung wurde zunächst ein abstraktes Systemmodell entwickelt, das die betrachteten Elemente sowie deren Relationen beschreibt. Diese wurde anschließend mittels eines Metamodells in eine Multiple-Domain Matrix überführt. Das damit vorliegende **integrierte Produkt- und Prozessmodell** bildet die Systemstruktur auf Funktions-, Komponenten-, Prozessschritt-, Prozessergebnis-, Meilenstein- und Personenebene ab. Die im Modell enthaltenen Teilmatrizen können untereinander verknüpft und mittels Transformationsregeln ineinander überführt werden. Dies ermöglicht die Identifikation und Analyse von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten in Produkt- und Prozessstruktur. Es gestattet den Wechsel zwischen unterschiedlichen Perspektiven (funktions- bzw. komponentenorientiert) sowie die Ableitung von indirekten Abhängigkeiten. Die Darstellung in Form von Matrizen und Graphen ist unabhängig von disziplinspezifischen Modellen und gleichzeitig disziplinübergreifend verständlich, was zu einem erhöhten Systemverständnis beiträgt. Weiterhin wird die Abbildung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen sowie die prozessbegleitende Konkretisierung und Anpassung unterstützt.

Zur Unterstützung der **Prozessplanung** wurde ein funktionsorientiertes Vorgehen zur Erstellung eines disziplinübergreifenden Entwicklungsprozesses unter Berücksichtigung der Produktarchitektur entwickelt. Hierfür können unterschiedliche Herangehensweisen gewählt werden. Zum einen kann aus der Analyse von Charakteristika und Merkmalen der Funktions- und Komponentenstruktur die Identifikation funktionsabprüfender Meilensteine sowie deren Reihenfolge erfolgen. Zum anderen können die Meilensteininhalte auf Grundlage von spezifischen Randbedingungen direkt definiert werden. Auf dieser Basis werden im Anschluss die erforderlichen Prozessergebnisse definiert sowie die zu ihrer Realisierung notwendigen Prozessschritte abgeleitet. Die Anknüpfung von Personen ist über Funktionen, Komponenten sowie Prozessschritte möglich. Der Planungsprozess findet iterativ statt, wobei nach jedem Durchlauf eine Plausibilitätskontrolle bezüglich disziplinübergreifender Abhängigkeiten stattfindet. Das Vorgehen ermöglicht die Integration disziplinspezifischer Vorgehensmodelle, die Synchronisierung der Teilprozesse erfolgt über die zu erbringenden Funktionen.

Die entwicklungsbegleitende Synchronisation der Prozesse wird über spezifische Möglichkeiten der **Prozessanalyse** unterstützt. Auf Basis des integrierten Produkt- und Prozessmodells können disziplinübergreifende Wirk- und Änderungsabhängigkeiten analysiert und transparent dargestellt werden. Dies führt zu einem besseren Verständnis über die Abhängigkeiten

von Produkt- und Prozessstruktur und ermöglicht die Unterstützung von Entscheidungen. Die Entwickler stehen somit Informationen zur Verfügung, welche Funktionen bzw. Komponenten bei Änderungen betroffen sind und wer darüber zu informieren ist. Ebenso können Inhalte von Meilensteinen aus Funktions- sowie Komponentenperspektive betrachtet werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Ableitung von phasenspezifischen und problemspezifischen Team- und Kommunikationsstrukturen, welche ebenfalls zur effektiven Synchronisation der disziplinspezifischen Prozesse beiträgt.

Die **Steuerung und Kontrolle** des Prozesses erfordert die Modellierung des Entwicklungsfortschrittes zur Identifikation von Abweichungen und Ableitung geeigneter Maßnahmen. Daher wurden grundlegende Betrachtungen zu Reifegraden in mechatronischen Produkten angestellt. Aufbauend auf einer Anforderungsklä rung wurde das Konzept einer **funktionsorientierten Reifegradmodellierung** unter besonderer Berücksichtigung der vielfältigen Abhängigkeiten erarbeitet. Anhand dessen konnte gezeigt werden, dass die in einem solchen System berechneten Kennzahlen aufgrund der Komplexität nur bedingt Aussagekraft für Entwickler beinhalten. Ein höheres Interesse besteht an zeitlichen Aussagen zur Korrektur einer festgestellten Zielabweichung. Zur Fortschrittkontrolle wurde daher ein einfaches System basierend auf dem Erfüllungsgrad von Funktionen, Prozessergebnissen sowie Prozessschritten erstellt.

Abschließend wurden Betrachtungen zur **Toolunterstützung** durchgeführt, die für eine effektive Anwendung der Methodik im industriellen Umfeld erforderlich ist. Dabei wurde ein Toolkonzept erstellt, in das grundlegende Anforderungen wie der Rückgriff auf Wissensdatenbanken und Prozessmodelle, die Anbindung von PDM/PLM-Systemen zur automatisierten Modellerstellung sowie eine Benutzerschnittstelle mit anwenderspezifischen Rollen und Blickwinkeln erarbeitet und zu einem Toolkonzept integriert wurden. In diesem Kontext wurde auch ein im Rahmen der Projektbearbeitung entstandenes **Konzept zur Visualisierung** des integrierten Produkt- und Prozessmodells dargestellt. Die Visualisierung ermöglicht eine dreidimensionale Darstellung des Systemmodells und somit die simultane grafische Darstellung und Analyse von domäneninternen sowie -übergreifenden Abhängigkeiten.

Zum Abschluss erfolgte eine **Evaluation** des entwickelten Ansatzes anhand der Entwicklung eines Schiebhebedachs in der Automobilindustrie. An diesem konnten die Anwendbarkeit sowie die Potentiale der Methodik an einem anwendungsnahen Entwicklungsobjekt gezeigt werden. Zusätzlich wurden Expertengespräche und Interviews mit Vertretern aus Wissenschaft und Industrie durchgeführt, deren Ergebnisse in die Weiterentwicklung der Methodik einfließen. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Bewertung des Ansatzes hinsichtlich der gestellten Anforderungen.

### 7.3 Ausblick

Mit der integrativen Betrachtung von Produkt- und Prozessstrukturen sowie einer konsequenten Funktionsorientierung zur Prozessplanung und -synchronisation, konnten die wesentlichen Ziele der Arbeit erreicht werden. Einige Punkte konnten jedoch nicht abschließend behandelt werden bzw. bieten Potential für zukünftige Forschungsarbeiten.



Ein Punkt betrifft die Erweiterung der Betrachtungen zur Prozessunterstützung auf das Multiprojektmanagement sowie die Berücksichtigung der Ressourcenallokation. Aus der Vernetzung von Entwicklungsprozessen in Multiprojektsituationen ergeben sich weitere Randbedingungen und Einschränkungen, die bisher nicht betrachtet wurden. Ebenso ist die zeitliche und personelle Verfügbarkeit von Entwicklungskapazitäten bisher nicht integriert.

Die dynamische Veränderung des Modells über der Zeit bietet ebenfalls Potential für weitere Forschungsarbeiten. Das Modell kann hinsichtlich unterschiedlicher Anwendungsfälle bezüglich fixer und variabler Bereiche untersucht werden. Hieraus können Rückschlüsse zur Wissensspeicherung und die Wiederverwendbarkeit von Modellen gezogen, sowie Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Ebenso können Erkenntnisse und Methoden zur Modellierung zeitlicher Veränderungen von Strukturen integriert werden [EBEN et al. 2008; HELMS et al. 2009].

Die Produktarchitektur wird in dieser Arbeit als Eingangsgröße betrachtet. Die Partitionierung des Konzeptes hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklungsprozesse, da durch sie Art und Anzahl der Schnittstellen zwischen den Disziplinen festgelegt werden. Es ist somit zu untersuchen, wie die Produkt- und Disziplinstruktur aus technischer, sowie auch aus Prozess- und Organisationsperspektive optimal gestaltet werden kann. Hierzu können Strukturmerkmale und Metriken aus der Graphentheorie herangezogen werden, die bereits im Kosten- und Prozessmanagement erfolgreich angewandt werden [ZIRKLER 2010, KREIMEYER 2010].

Ebenso könne die Detaillierungsgrade der unterschiedlichen Matrizen näher betrachtet werden. Hierbei ist zu untersuchen, welche Grenzen der Modellierungsansatz in Bezug auf Abstraktionsebenen sowie Skalierbarkeit (Umfang des betrachteten Systems) aufweist. Von besonderem Interesse ist dabei die Integrierbarkeit von Iterationen im Prozess, womit eine Anwendung im Rahmen des Lean Development ermöglicht wird. Erste Ansätze hierzu wurden bei [ELEZI et al. 2011] gezeigt.

Ein großes Potential bietet die Anwendung von quantifizierten Matrizen. Der vorliegende Ansatz verwendet ausschließlich binäre Matrizen zur Abbildung von Abhängigkeiten. Es ist zu untersuchen, ob und wie die Differenzierung von Relationsarten sowie die Quantifizierung der Relationsstärke zur Optimierung der Planung und Synchronisation verwendet werden können.

Umfangreiches Forschungspotential bietet die Thematik der Reifegrade für mechatronische Systeme. Hierzu wurden lediglich grundlegende Betrachtungen durchgeführt sowie zentrale Herausforderungen und Anforderungen identifiziert. Mit der Entwicklung eines Reifegradsystems, welches den spezifischen Herausforderungen der Mechatronik wie Funktionsorientierung und hoher Vernetzungsgrad gerecht wird, kann eine erheblich verbesserte Erfassung und Darstellung des Entwicklungsfortschrittes erfolgen. Eine transparente Modellierung führt zu einer weiteren Erhöhung des Systemverständnisses in Bezug auf den aktuellen Status der Entwicklung und kann somit zu einer optimierten Prozesssteuerung beitragen.

Es besteht weiterhin Forschungsbedarf in Bezug auf die Unterstützung von Entscheidungssituationen. Diese können sich aufgrund von sich dynamisch verändernden Randbedingungen sowie aufgrund der zunehmenden Konkretisierung entstehen. Ein verbessertes Verständnis von Abläufen der Entscheidungsfindung sowie der erforderlichen Informationsgrundlage in

Bezug auf Handlungsalternativen und deren Auswirkungen kann zu einer weiteren Steigerung von Effizienz und Effektivität der Prozesse genutzt werden. Hierzu gibt es bereits erste Erkenntnisse aus dem Bereich des Zyklusmanagements von Innovationsprozessen [LANGER et al. 2011], die im Folgenden mit dem Ansatz kombiniert werden können.

Zur Anwendbarkeit der Methodik in einem industriellen Rahmen ist eine durchgängige Rechnerunterstützung zur Erstellung, Manipulation, Analyse und Visualisierung des Modells erforderlich. Hierzu wurden lediglich konzeptionelle Überlegungen angestellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung einer disziplinübergreifend und intuitiv verständlichen Repräsentation des integrierten Systemmodells.

Die Rechnerunterstützung ermöglicht eine einfachere Anwendbarkeit der Methodik auf weitere Entwicklungsobjekte. Insbesondere ist zu untersuchen, inwiefern eine Übertragung auf Entwicklungsprojekte außerhalb der Serienentwicklung möglich ist bzw. welche Anpassungen und Ergänzungen in diesem Fall notwendig sind.

## 8. Literaturverzeichnis

ADAM 1998

Adam, D. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement. Wiesbaden: Gabler 1998.

ADAMSSON 2007

Adamsson, N.: Interdisciplinary integration in complex product development - Managerial implications of embedding software in manufactured goods. Stockholm: Royal Institute of Technology, Diss. 2007.

AHMAD et al. 2011

Ahmad, N.; Wynn, D. C.; Clarkson, P. J.: Information models used to manage engineering change: A review of the literature 2005-2010. In: Culley, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED'11), Copenhagen, Denmark, 15. - 18. August 2011, S. 538-549. Lyngby: Technical University of Denmark, The Design Society 2011.

ALBERS & MEBOLDT 2007

Albers, A.; Meboldt, M.: SPALTEN Matrix - Product Development Process on the Basis of Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): The Future of Product Development. Proceedings of the 17th CIRP Design Conference, S. 43 - 52. Berlin: Springer 2007.

ALLWEYER 2005

Allweyer, T.: Geschäftsprozessmanagement - Strategie, Entwurf, Implementierung, Controlling. Bochum: W3L 2005.

ANACKER et al. 2011

Anacker, H.; Dorociak, R.; Dumitrescu, R.; Gausemeier, J.: Integrated tool-based approach for the conceptual design of advanced mechatronic systems. In: 2011 IEEE International Systems Conference (SysCon), Montreal, QC, 4-7 April 2011, S. 506-511. Montreal: IEEE 2011.

ANDRÁSFAI 1991

Andrásfai, B.: Graph theory: flows, matrices. Bristol: Adam Hilger 1991.

ANDREASEN & HEIN 1987

Andreasen, M. M.; Hein, L.: Integrated Product Development. London: IFS Publications/Springer 1987.

ANTONSSON 1997

Antonsson, E. K.: The potential for mechanical design compilation. Research in Engineering Design 9 (1997) 4, S. 191-194.

ARMSTRONG & GRAY 1993

Armstrong, J. R.; Gray, F. G.: Structured logic design with VHDL. Upper Saddle River: Prentice Hall 1993.

AUSTIN et al. 2002

Austin, S.; Newton, A.; Steele, J.; Waskett, P.: Modelling and managing project complexity. International Journal of Project Management 20 (2002) 3, S. 191-198.

**BADKE-SCHAUB & GEHRLICHER 2003**

Badke-Schaub, P.; Gehrlicher, A.: Patterns of decisions in design: leaps, loops, cycles, sequences and meta-processes. In: Folkesson, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED'03), Stockholm, Sweden, 19.-21. August 2003, S. 313-314. Stockholm: Royal Institute of Technology, The Design Society 2003.

**BALAZOVA 2004**

Balazova, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Paderborn: Universität, Diss. 2004.

**BALDWIN & CLARK 2000**

Baldwin, C. Y.; Clark, K. B.: Design rules: The power of modularity. Cambridge, MA: The MIT Press 2000.

**BALZERT 2000**

Balzert, H.: Lehrbuch der Software-Technik. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum 2000.

**BATHELT 2006**

Bathelt, J.: Entwicklungsmethodik für SPS-gesteuerte mechatronische Systeme. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, Diss. 2006.

**BAUMBERGER 2007**

Baumberger, G. C.: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. München: Dr. Hut 2007. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

**BECKER et al. 2008**

Becker, J.; Kugeler, M.; Rosemann, M. (Hrsg.): Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. 6. Auflage. Berlin: Springer 2008.

**BETZ et al. 2007**

Betz, M.; Buss, M.; Wollherr, D.: Cognitive technical systems - what is the role of artificial intelligence? KI 2007: Advances in Artificial Intelligence (2007) S. 19-42.

**BELLALOUNA 2009**

Bellalouna, F.: Integrationsplattform für eine interdisziplinäre Entwicklung mechatronischer Produkte. Bochum: Ruhr-Universität, Diss. 2009.

**BENABDELLATIF 2002**

Benabdellatif, M.: Process modelling analysis: comparison between activity-oriented models, product-oriented models and decision-oriented models. In: Zanasi, A. et al. (Hrsg.): Data Mining III. 3. Auflage. Southampton: WIT Press 2002.

**BENDER 2005**

Bender, K. (Hrsg.): Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. Berlin: Springer 2005.

**BENEKE 2003**

Beneke, F.: Konzeptionelle Ansätze einer prozessorientierten Produktentwicklung. Aachen: Shaker 2003. Zugl.: Essen: Universität, Diss. 2003

## BENEKE 2004

Beneke, F.: Produktentwicklung. Arbeiten in und mit verschiedenen Disziplinen - wozu? In: Brand, F. et al. (Hrsg.): Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven. Beiträge zur THESIS-Arbeitstagung im Oktober 2003 in Göttingen. Göttingen, Universitätsverlag 2004.

## BERTSCHE et al. 2009

Bertsche, B.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H. J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin: Springer 2009.

## BICHLMAIER 2000

Bichlmaier, C.: Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen. München: Utz 2000. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2000

## BIEDERMANN &amp; LINDEMANN 2008

Biedermann, W.; Lindemann, U.: Cycles in the multiple-domain matrix interpretation and applications. In: Kreimeyer, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference (DSM'08), Stockholm, Sweden, 11.-12. November 2008, S. 25-34. München: Hanser 2008.

## BIEDERMANN &amp; LINDEMANN 2011

Biedermann, W.; Lindemann, U.: Prediction of Communication Structures Based on Product Structures. In: Eppinger, S. D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International DSM Conference (DSM'11), Cambridge, MA, 14.-15.09.2011, S. 291-300. München: Hanser 2011.

## BLECK et al. 1996

Bleck, A.; Goedecke, M.; Huss, S.; Waldschmidt, K.: Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. Stuttgart: Teubner 1996.

## BLESSING &amp; CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. London: Springer 2009.

## BOEHM 1981

Boehm, B. W.: Software engineering economics. Upper Saddle River: Prentice Hall 1981.

## BOEHM 1988

Boehm, B. W.: A spiral model of software development and enhancement. Computer 21 (1988) 5, S. 61-72.

## BOLLOBÁS 1990

Bollobás, B.: Graph Theory. New York: Springer 1990.

## BOLTON 2003

Bolton, W.: Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering. Upper Saddle River: Prentice Hall 2003.

## BOOCH et al. 2007

Booch, G.; Maksimchuk, R.; Engle, M.; Young, B.; Conallen, J.; Houston, K.: Object-oriented analysis and design with applications. Boston: Addison-Wesley Professional 2007.

## BOUCHER &amp; HOULIHAN 2008

Boucher, M.; Houlihan, D.: System Design: New Product Development for Mechatronics. The Aberdeen Group 2008. [entnommen am 19.07.2010, URL: <http://www.aberdeen.com>]

## BRAESS 2006

Braess, H.-H.: Paradigmenwechsel im Automobilbau - Eine übergreifende Betrachtung. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 1 (2006)

## BRAESS &amp; SEIFFERT 2007

Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg 2007.

## BRAND 2004

Brand, F.: Transdisziplinarität - Voraussetzung für naturwissenschaftlichen und mathematischen Erkenntnisgewinn? In: Brand, F. et al. (Hrsg.): Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven. Beiträge zur THESIS-Arbeitstagung im Oktober 2003 in Göttingen. Göttingen: Universitätsverlag 2004.

## BRANDSTETTER et al. 2000

Brandstetter, S.; Höfig, B.; Huang, M.; Kohlschmied, F.; Rothfluss, R.; Schuller, J.: Entwicklungsumgebung Hochleistungshydraulik. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme, S. 323-382. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2000.

## BRAUN et al. 2007a

Braun, S. C.; Diehl, H.; Petermann, M.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Function Driven Process Design for the Development of Mechatronic Systems. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International DSM Conference (DSM'07), München, 11.-12.11.2007. Aachen: Shaker 2007

## BRAUN et al. 2007b

Braun, S. C.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Kostentransparenz in der Mechatronik - Eine Studie über Komplexitäts- und Kostentreiber mechatronischer Produkte. Aachen: Shaker Online 2007.

## BREUER &amp; BILL 2006

Breuer, B.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2006.

## BRÖHL 1995

Bröhl, A. P. (Hrsg.): Das V-Modell - der Standard für die Softwareentwicklung. 2. Auflage. München: Oldenbourg 1995.

## BROWNING &amp; EPPINGER 2002

Browning, T.; Eppinger, S. D.: Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development. IEEE Transactions on Engineering Management 49 (2002) 4, S. 428-442.

## BROWNING 2000

Browning, T. R.: Using the Design Structure Matrix (DSM) for process integration. In: Proceedings of the 34th Annual Event of the Government Electronics and Information Association (GEIA): 2000 Engineering and Technical Management Symposium, Dallas, 25.-29. September 2000, S. 131-140. Dallas: Electronic Industries Association 2000.

## BROWNING 2001

Browning, T. R.: Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management* 48 (2001) 3, S. 292-306.

## BROWNING 2009

Browning, T. R.: The many views of a process: Towards a process architecture framework for product development processes. *Systems Engineering* 12 (2009) 1, S. 69-90.

## BROWNING et al. 2006

Browning, T. R.; Fricke, E.; Negele, H.: Key concepts in modeling product development processes. *Systems Engineering* 9 (2006) 2, S. 104-128.

## BROWNING &amp; RAMASESH 2007

Browning, T. R.; Ramasesh, R. V.: A Survey of Activity Network-Based Process Models for Managing Product Development Projects. *Production and Operations Management* 16 (2007) 2, S. 217-240.

## BRUNS 1991

Bruns, M.: *Systemtechnik: Ingenieurwissenschaftliche Methodik zur interdisziplinären Systementwicklung*. Springer 1991.

## BSH 2012a

BSH (Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH): Die Waschmaschine als Wassersparfuchs. [entnommen am 23.02.01.2012, URL: <http://www.bshg.com/index.php?122123>].

## BSH 2012b

BSH (Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH): *Pressemappe Innovationen*. [entnommen am 30.01.2012, URL: <http://www.bshg.com/index.php?124811>].

## BUCHENRIEDER 2001

Buchenrieder, K. J.: *Hardware/Software Codesign*. In: Buchenrieder (Hrsg.): *Hardware/Software Codesign*. Bruchsal: ITpress 2001.

## BURGHARDT 2008

Burghardt, M.: *Projektmanagement - Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten*. 8. Auflage. Erlangen: Publics Corporate Publishing 2008.

## BUUR 1990

Buur, J.: *A theoretical approach to mechatronics design*. Lynbgy: Technical University of Denmark, Diss. 1990.

## CARDOSO 2005

Cardoso, J.: How to measure the control-flow complexity of web processes and workflows. *The Workflow Handbook*, S. 199-212. Hingham: WfMC 2005.

## CATALDO et al. 2006

Cataldo, M.; Wagstrom, P. A.; Herbsleb, J. D.; Carley, K. M.: Identification of coordination requirements: Implications for the design of collaboration and awareness Tools. In: *Proceedings of the 2006 20th Anniversary Conference on Computer Supported Cooperative Work*, Banff, Alberta, Canada, 04.-08. November 2008, S. 353-362. New York: ACM 2006.

CHALUPNIK et al. 2009

Chalupnik, M. J.; Wynn, D. C.; Clarkson, P. J.: Approaches to mitigate the impact of uncertainty in development processes. In: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09), Stanford, California, 24.-27.08.2009, S. 459-470. Stanford University: CER, The Design Society 2009.

CHANG et al. 1997

Chang, H.; Charbon, E.; Choudhury, U.; Demir, A.; Felt, E.; Liu, E.; Malavasi, E.; Sangiovanni-Vincentelli, A.; Vassiliou, I.: A top-down constraint-driven design methodology for analog integrated circuits. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers 1997.

CHEN et al. 2009

Chen, K.; Bankston, J.; Panchal, J. H.; Schaefer, D.: A framework for integrated design of mechatronic systems. Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing (2009) S. 37-70.

CHOI & PAK 2006

Choi, B. C.; Pak, A. W.: Multidisciplinarity, interdisciplinarity and transdisciplinarity in health research, services, education and policy: 1. Definitions, objectives, and evidence of effectiveness. Clinical and investigative medicine. *Medecine clinique et experimentale* 29 (2006) 6, S. 351-364.

CHRISTIANSEN 2009

Christiansen, S.-K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Paderborn: Universität, Diss. 2009.

CHUCHOLOWSKI 2011

Chucholowski, N.: Analyse und Modellierung der Informationsübergabe an der Schnittstelle zwischen Produktplanung und Entwicklungsprozessplanung. Unveröffentlichte Semesterarbeit. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2011.

CLARKSON et al. 2004

Clarkson, P. J.; Simons, C.; Eckert, C.: Predicting change propagation in complex design. *Journal of Mechanical Design* 126 (2004) S. 788-797.

COLFER & BALDWIN 2010

Colfer, L.; Baldwin, C. Y.: The mirroring hypothesis: theory, evidence and exceptions. Working Paper 10-058. Cambridge, MA: Harvard Business School 2010. [entnommen am 27.05.2011, URL: <http://www.hbs.edu/research/pdf/10-058.pdf>].

COLLIN 2001

Collin, H.: Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen. München: Dr. Hut 2001. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2001.

CZICHOS 2008

Czichos, H.: Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2008.

DAIS 2004

Dais, S.: Herausforderungen eines Automobilzulieferers. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 106 (2004) 4, S. 18-21.



## DANILOVIC &amp; BÖRJESSON 2001

Danilovic, M.; Börjesson, H.: Managing the Multiproject Environment In: Proceedings of the 3rd Dependence Structure Matrix (DSM'01) International Workshop, MIT, Cambridge, USA, 29.10--30.10.2001. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology 2001

## DANILOVIC &amp; BROWNING 2004

Danilovic, M.; Browning, T.: A formal approach for domain mapping matrices (DMM) to complement design structure matrices (DSM). In: Proceedings of the 6th Design Structure Matrix (DSM'06) International Workshop, Cambridge, UK, 12.09.-14.09.2004. Cambridge: University of Cambridge 2004

## DANILOVIC &amp; BROWNING 2007

Danilovic, M.; Browning, T. R.: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management* 25 (2007) 3, S. 300-314.

## DANILOVIC &amp; SANDKULL 2002

Danilovic, M.; Sandkull, B.: Managing Complexity and Uncertainty in a Multiproject Environment. In: Proceedings of the 5th International Conference of the International Research Network on Organizing by Projects, Rotterdam. Rotterdam: Erasmus University 2002

## DANILOVIC &amp; SIGEMYR 2003

Danilovic, M.; Sigemyr, T.: Multiplan - a new multi-dimensional DSM-tool. In: Proceedings of the 5th Design Structure Matrix (DSM'05) International Workshop, Cambridge, UK, 22.10.-23.10.2003. Cambridge: University of Cambridge 2003

## DAVENPORT 1993

Davenport, T. H.: Process innovation: reengineering work through information technology. Boston: Harvard Business Press 1993.

## DEMERS 2000

Demers, M.: Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen. München: Dr. Hut 2000. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2000.

## DETTMERING 2008

Dettmering, J. H.: Disziplinübergreifendes Datenmanagement im automobilen Entwicklungsprozess. Göttingen: Sierke 2008. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2008.

## DI BATTISTA et al. 1999

Di Battista, G.; Eades, P.; Tamassia, R.; Tollis, I. G.: Graph Drawing: Algorithms for the Visualization of Graphs. Upper Saddle River: Prentice Hall 1999.

## DIEHL 2009

Diehl, H.: Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme. München: Dr. Hut 2009. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2009.

## DIEHL et al. 2008

Diehl, H.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Transparent 3D Visualization of mechatronic systemstructures. In: Marjanovic, D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Design Conference (DESIGN'08), Dubrovnik, Croatia, 19.-22.05.2008. Glasgow: The Design Society 2008.

## DIN 1987

DIN - Deutsches Institut für Normung: Projektmanagement - Begriffe (DIN 69 901). Berlin: Beuth 1987.

## DoD 2001

DoD (Department of Defence): Systems Engineering Fundamentals. Fort Belvoir: Defence Acquisition University Press 2001. [entnommen am 08.03.2012, URL: <http://www.dau.mil/pubs/pdf/SEFGuide%2001-01.pdf>].

## DoD 2008

DoD (Department of Defence): Systems Engineering Guide for Systems of Systems. Washington, DC: ODUSD(A&T)SSE 2008. [entnommen am 08.03.2012, URL: <http://www.acq.osd.mil/se/docs/SE-Guide-for-SoS.pdf>]

## DOHMEN 2002

Dohmen, W.: Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme. München: Utz 2002. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2002.

## DÖRNER 1994

Dörner, D.: Gedächtnis und Konstruieren. In: Pahl, G. (Hrsg.): Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ergebnisse des Ladenburger Diskurses vom Mai 1992 bis Oktober 1993, S. 150-160. Köln: TÜV Rheinland 1994.

## DÖRNER 2003

Dörner, D.: Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. 10. Auflage. Hamburg: Rowohlt Taschenbuch 2003.

## DOROCIAC &amp; TSCHIRNER 2010

Dorociak, R.; Tschirner, C.: Modellbasiertes Systems Engineering als Schlüssel zu einer ganzheitlichen Produktentstehung. Newsletter Berliner Kreis - Mitteilungen des Berliner Kreises 2/2010 (2010), S. 13-14.

## DUDEN 2012

Duden: Duden online. [entnommen am 10.02.2012, URL: <http://www.duden.de/>].

## DUMITRESCU 2011

Dumitrescu, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Paderborn: Universität, Diss. 2011.

## EBEN et al. 2008

Eben, K.; Biedermann, W.; Lindemann, U.: Modeling structural Change over Time – requirements and first methods. In: Kreimeyer, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference (DSM'08), Stockholm, Sweden, 11.-12.11.2008, S. 363-374. München: Hanser 2008.

## ECKERT &amp; CLARKSON 2005

Eckert, C.; Clarkson, J.: The reality of design. In: Clarkson, J. et al. (Hrsg.): Design process improvement: A review of current practice. London: Springer 2005.

## ECKERT &amp; CLARKSON 2010

Eckert, C. M.; Clarkson, P. J.: Planning development processes for complex products. *Research in Engineering Design* 21 (2010) 3, S. 153-171.

## EHLERS 2000

Ehlers, K.: Produktentwicklung-Problemfelder der integrierten Elektronik-Entwicklung im Produktentstehungsprozess. *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 102 (2000) 10, S. 878-887.

## EHRENSPIEL 2006

Ehrenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Auflage. München: Hanser 2006.

## EHRENSPIEL et al. 2007

Ehrenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6. Auflage. Berlin: Springer 2007.

## EIGNER et al. 2012

Eigner, M.; Anderl, R.; Stark, R.: Interdisziplinäre Produktentstehung. In: Anderl, R. et al. (Hrsg.): *Smart Engineering - Interdisziplinäre Produktentstehung*. acatech DISKUSSION April 2012, S. 7-16. Berlin: Springer 2012.

## EIGNER &amp; STELZER 2009

Eigner, M.; Stelzer, R.: *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2. Auflage. Berlin: Springer 2009.

## EISENBART &amp; BLESSING 2011

Eisenbart, B.; Blessing, L.: Application of Design Models in Mechatronic Product Development and Building Design – Reflections of Researchers and Practitioners. In: Krause, D. et al. (Hrsg.): *Design for X. Beiträge zum 22. DFX Symposium, Tutzing bei München, 11.-12.10.2011*. Hamburg: TuTech Verlag 2011.

## EL-KHOURY 2006

El-Khoury, J.: A model management and integration platform for mechatronics product development. Stockholm: Royal Institute of Technology, Diss. 2006.

## ELEZI et al. 2011

Elezi, F.; Graebisch, M.; Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: Application of Multi-Domain Matrix Waste Reduction Methodology in Mechatronic Product Development. In: Chakrabarti, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Research into Design Engineering (ICORD'11), Bangalore, India, 10.-12.01.2011*. Glasgow: The Design Society 2011.

## ENGE 2005

Enge, O.: *Analyse und Synthese elektromechanischer Systeme*. Chemnitz: Technische Universität, Diss. 2005.

## EPPINGER &amp; SALMINEN 2001

Eppinger, S.; Salminen, V.: Patterns of product development interactions. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design (ICED'01), Glasgow, 21.-23. August 2001*. Bury St. Edmunds: IMechE 2001

EPPINGER & BROWNING 2012

Eppinger, S. D.; Browning, T. R. (Hrsg.): Design Structure Matrix Methods and Applications. Cambridge, MA: The MIT Press 2012.

EPPINGER et al. 1994

Eppinger, S. D.; Whitney, D. E.; Smith, R. P.; Gebala, D. A.: A model-based method for organizing tasks in product development. Research in Engineering Design (1994) 6, S. 1-13.

ERDEN et al. 2008

Erden, M. S.; Komoto, H.; Van Beek, T. J.; D'Amelio, V.; Echavarria, E.; Tomiyama, T.: A review of function modeling: Approaches and applications. Artificial Intelligence Engineering Design, Analysis and Manufacturing 22 (2008) 2, S. 147-169.

ESCHERMANN 1993

Eschermann, B.: Funktionaler Entwurf digitaler Schaltungen. Berlin: Springer 1993.

ESTEFAN 2008

Estefan, J. A.: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. INCOSE MBSE Focus Group 2008.

EVERSHEIM 1995

Eversheim, W.: Prozessorientierte Unternehmensorganisation - Konzepte und Methoden zur Gestaltung "schlanker" Organisationen. Berlin: Springer 1995.

EVERSHEIM et al. 1995

Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering: Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin: Springer 1995.

EVERSHEIM & SCHUH 2005

Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer 2005.

FELGEN 2007

Felgen, L.: Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte. München: Dr. Hut 2007. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

FISCHER et al. 2008

Fischer, M.; Braun, S.; Hellenbrand, D.; Richter, C.; Sabbah, O.; Scharfenberger, C.; Strolz, M.; Kuhl, P.; Färber, G.: Multidisciplinary development of new door and seat concepts as part of an ergonomic ingress/egress support system. In: Proceedings of The FISITA World Automotive Congress, München, 14.-19.09.2008. London: FISITA (UK) Limited 2008

FLATH 2002

Flath, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Paderborn: Universität, Diss. 2002.

FLATH et al. 2000

Flath, M.; Kespohl, H.; Möhringer, S.; Oberschelp, O.: Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80 2000.

FÖLLINGER 1994

Föllinger, O.: Regelungstechnik. 10. Auflage. Heidelberg: Hüthig 1994.

FRANK 2006

Frank, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Paderborn: Universität, Diss. 2006.

FRESE & HORVATH 1996

Frese, E.; Horvath, P.: Organisationsstrukturen und Managementsysteme. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management - Betriebshütte. Berlin: Springer 1996.

FRIEDENTHAL et al. 2011

Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: A practical guide to SysML: The systems modeling language. Burlington: Morgan Kaufmann 2011.

GAITANIDES et al. 1994

Gaitanides, M.; Scholz, R.; Vrohling, A.; Raster, M.: Prozessmanagement: Konzepte, Umsetzungen und Erfahrungen des Re-engineering. München: Hanser 1994.

GAUSEMEIER 2010

Gausemeier, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. München: Hanser 2010.

GAUSEMEIER et al. 2010

Gausemeier, J.; Dorociak, R.; Kaiser, L.: Computer-Aided Modeling of the Principle Solution of Mechatronic Systems: A Domain-Spanning Methodology for the Conceptual Design of Mechatronic Systems. In: Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2010) Montreal, Canada 15.-18.08.2010. Montreal, Canada: ASME 2010

GAUSEMEIER et al. 2001

Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Hanser 2001.

GAUSEMEIER et al. 2009a

Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design 20 (2009) 4, S. 201-223.

GAUSEMEIER et al. 2005

Gausemeier, J.; Frank, U.; Steffen, D.: Entwicklung selbstoptimierender Systeme. Konstruktion 10 (2005) S. 67-74.

GAUSEMEIER et al. 2006

Gausemeier, J.; Hahn, A.; Kespohl, H. D.; Seifert, L.: Vernetzte Produktentwicklung: Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking. München: Hanser 2006.

GAUSEMEIER & LINDEMANN 2012

Gausemeier, J.; Lindemann, U.: Produktentwicklung braucht Systems Engineering. Impulsvortrag Workshop 3, Jahrestagung WiGeP 2012. News - Mitteilungen der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP 2/2012 (2012), S. 5-6.

## GAUSEMEIER &amp; LÜCKEL 2000

Gausemeier, J.; Lückel, J. (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2000.

## GAUSEMEIER et al. 2009b

Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München: Hanser 2009.

## GAUSEMEIER &amp; REDENIUS 2005

Gausemeier, J.; Redenius, A.: Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Schächli, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser 2005.

## GAUSEMEIER et al. 2009c

Gausemeier, J.; Schäfer, W.; Greenyer, J.; Kahl, S.; Pook, S.; Rieke, J.: Management of cross-domain model consistency during the development of advanced mechatronic systems. In: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09), Stanford, California, 24.-27.08.2009. Stanford University: CDR, The Design Society 2009.

## GEHRKE 2005

Gehrke, M.: Entwurf mechatronischer Systeme auf Basis von Funktionshierarchien und Systemstrukturen. Paderborn: Universität, Diss. 2005.

## GEISBERGER &amp; SCHMIDT 2005

Geisberger, E.; Schmidt, R.: ProMiS - Projektmanagement für interdisziplinäre Systementwicklungen. Frankfurt a.M.: VDMA Verlag 2005.

## GERALDI et al. 2011

Geraldi, J.; Maylor, H.; Williams, T.: Now, let's make it really complex (complicated): A systematic review of the complexities of projects. International Journal of Operations & Production Management 31 (2011) 9, S. 966-990.

## GOKPINAR et al. 2010

Gokpinar, B.; Hopp, W. J.; Iravani, S. M. R.: The Impact of Misalignment of Organizational Structure and Product Architecture on Quality in Complex Product Development. Management Science 56 (2010) 3, S. 468-484.

## GÖPFERT 1998

Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1998. Zugl. München: Universität, Diss. 1998.

## GRABOWSKI et al. 1993

Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.; Warnecke, H. J.: Integriertes Produktmodell. Berlin: Beuth 1993.

## GRABOWSKI &amp; GEIGER 1997

Grabowski, H.; Geiger, K.: Neue Wege zur Produktentwicklung. Berlin: Raabe 1997.

## GROMER 2004

Gromer, J.: Die Komplexität bestimmt der Kunde. Entwicklung - Interview. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 1 (2004) S. 40-43.

## GROSS &amp; YELLEN 2006

Gross, J. L.; Yellen, J.: Handbook of Graph Theory. 2. Auflage. Boca Raton: CRC Press 2006.

## HABERFELLNER et al. 2012

Haberfellner, R.; de Weck, O.; Fricke, E.; Vössner, S. (Hrsg.): Systems Engineering - Grundlagen und Anwendung. 12 Auflage. Zürich: Orell Füssli 2012.

## HAMMER &amp; CHAMPY 1993

Hammer, M.; Champy, J.: Reengineering the Corporation - A Manifesto for Business Revolution. New York: Harper Business 1993.

## HARASHIMA et al. 1996

Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T.: Mechatronics - "What Is It, Why, and How? An Editorial. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, S. 1-4.

## HASKINS 2010

Haskins, C. (Hrsg.): INCOSE Systems Engineering Handbook - A guide for System Life Cycle Processes and Activities. USA: INCOSE 2010.

## HAUSER &amp; CLAUSING 1988

Hauser, J. R.; Clausing, D.: The House of Quality. Harvard Business Review 66 (1988) 3, S. 63-73.

## HEIMANN et al. 2006

Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik: Komponenten - Methoden - Beispiele. München: Hanser 2006.

## HEINZL 1985

Heinzl, J.: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1985.

## HELLENBRAND et al. 2010

Hellenbrand, D.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Integrierte funktionsorientierte Produkt- und Prozessmodellierung mechatronischer Produkte. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop - Entwurf mechatronischer Systeme (EMS'10), Paderborn, 18.-19.03.2010, S. 39-52. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2010.

## HELLENBRAND et al. 2012

Hellenbrand, D.; Diehl, H.; Zirkler, S. C.; Petermann, M.; Lindemann, U.: BMW Multidisciplinary Development of Electric Sunroof. In: Eppinger, S. D. et al. (Hrsg.): Design Structure Matrix Methods and Applications, S. 271-276. Cambridge, MA: The MIT Press 2012.

## HELLENBRAND &amp; LINDEMANN 2011

Hellenbrand, D.; Lindemann, U.: A Framework for integrated Process Modeling and Planning of mechatronic Products. In: Culley, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED'11), Copenhagen, Denmark, 15.-18.08.2011. Lyngby: Technical University of Denmark, The Design Society 2011.

## HELMS et al. 2009

Helms, B.; Eben, K.; Shea, K.; Lindemann, U.: Graph Grammars - A Formal Method for Dynamic Structure Transformation. In: Kreimeyer, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International DSM Conference (DSM'09), Greenville, SC, 12.-13.10.2009 S. 93-103. München: Hanser 2009.

## HELMS &amp; SHEA 2012

Helms, B.; Shea, K.: Computational Synthesis of Product Architectures Based on Object-Oriented Graph Grammars. *Journal of Mechanical Design* 134 (2012) S. 021008-1 - 021008-14.

## HERBERG et al. 2010

Herberg, A.; Langer, S.; Lindemann, U.: Ontogeny and Transformation of Product Models - Analysis based on Development Project Documentation. In: Marjanović, D. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Design Conference (DESIGN'10)*, Dubrovnik, Croatia, 17.-20.05.2010, S. 253-264. Glasgow: The Design Society 2010.

## HERFELD 2007

Herfeld, U.: *Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation*. München: Dr. Hut 2007. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

## HOETKER 2006

Hoetker, G.: Do modular products lead to modular organizations? *Strategic Management Journal* 27 (2006) 6, S. 501-518.

## HOFER 2007

Hofer, A.: *Prozessorientiertes Kooperationsmanagement: Methoden, Vorgehensmodell und Anwendungsszenario*. Berlin: Logos 2007.

## HÖHN &amp; HÖPPNER 2008

Höhn, R.; Höppner, S.: *Das V-Modell XT: Anwendungen, Werkzeuge, Standards*. Berlin: Springer 2008.

## HOLT &amp; PERRY 2008

Holt, J.; Perry, S.: *SysML for Systems Engineering*. London: Institution of Engineering & Technology 2008.

## HUBKA &amp; EDER 1996

Hubka, V.; Eder, W. E.: *Design Science*. Berlin: Springer 1996.

## HUPE 2009

Hupe, P.: *Informationsintensive Prozesse über heterogenen Arbeitsumgebungen: Aspektbasiertes Modell und Systemarchitektur*. Berlin: Logos 2009. Zugl. Hamburg: Technische Universität, Diss. 2008.

## ISERMANN 1996

Isermann, R.: Modeling and design methodology for mechatronic systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1 (1996) 1, S. 16-28.

## ISERMANN 2007

Isermann, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Berlin: Springer 2007.

## ISYPROM 2011

ISYPROM: *Modellbasierte Prozess- und Systemgestaltung für die Innovationsbeschleunigung. Überblick über die Ergebnisse des Verbundprojektes*. [entnommen am 14.09.2011, URL: [http://www.isyprom.de/images/documents/isyprombroschuere\\_2011\\_foremail.pdf](http://www.isyprom.de/images/documents/isyprombroschuere_2011_foremail.pdf)]



## ITQ 2011

ITQ: Kompetenz in Mechatronik. [entnommen am 14.09.2011, URL: [www.itq.de/files/itq\\_imagebroschuere.pdf](http://www.itq.de/files/itq_imagebroschuere.pdf)].

## JACKSON 2006

Jackson, C. K.: The Mechatronics System Design Benchmark Report - Coordinating Engineering Disciplines. The Aberdeen Group 2006. [entnommen am 06.08.2010, URL: <http://www.aberdeen.com>].

## JAEGER &amp; SCHERINGER 1998

Jaeger, J.; Scheringer, M.: Transdisziplinarität: Problemorientierung ohne Methodenzwang. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 7 (1998) 1, S. 10-25.

## JAKOBY 2010

Jakoby, W.: Projektmanagement für Ingenieure - Gestaltung technischer Innovationen als systemische Problemlösung in strukturierten Projekten. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2010.

## JAMSHIDI 2009

Jamshidi, M. (Hrsg.): System of Systems Engineering: Innovations for the 21st Century. Hoboken: John Wiley and Sons 2009.

## JANIA 2004

Jania, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Produkt- und Prozessmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Paderborn: Universität, Diss. 2004.

## JANSCHKE 2010

Janschek, K.: Systementwurf Mechatronischer Systeme: Methoden, Modelle, Konzepte. Berlin: Springer 2010.

## JANSEN 2007

Jansen, S.: Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme. Aachen: Shaker 2007. Zugl. Bochum: Ruhr-Universität, Diss. 2006.

## JARRATT et al. 2004

Jarratt, T.; Eckert, C. M.; Clarkson, P. J.; Stacey, M. K.: Providing an overview during the design of complex products. In: Proceedings of the First International Conference on Design Computation and Cognition (DCC'04), MIT, Cambridge, MA, 19.-21.07.2004. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology 2004 S. 239-258.

## JARRATT 2004

Jarratt, T. A. W.: A model-based approach to support the management of engineering change. Cambridge: University of Cambridge, Diss. 2004.

## JARRATT et al. 2010

Jarratt, T. A. W.; Eckert, C. M.; Caldwell, N. H. M.; Clarkson, P. J.: Engineering change: an overview and perspective on the literature. Research in Engineering Design 22 (2010) 2, S. 1-22.

## JIAO &amp; TSENG 2000

Jiao, J.; Tseng, M. M.: Fundamentals of product family architecture. Integrated Manufacturing Systems 11 (2000) 7, S. 469-483.

## JUNGERT 2010

Jungert, M.: Was zwischen wem und warum eigentlich? Grundsätzliche Fragen der Interdisziplinarität. In: Jungert, M. et al. (Hrsg.): Interdisziplinarität. Theorie, Praxis, Probleme, S. 1-12. Darmstadt: WGB 2010.

## KALLENBACH et al. 1997

Kallenbach, E.; Birli, O.; Saffert, E.; Schäffel, C.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. In: Tagung Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Moers, 10.-12.03.1997, S. 1-14. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

## KALLMEYER 1998

Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Paderborn: Universität, Diss. 1998 1998.

## KARNIEL &amp; REICH 2009

Karniel, A.; Reich, Y.: From DSM-based planning to design process simulation: A review of process scheme logic verification issues. IEEE Transactions on Engineering Management 56 (2009) 4, S. 636-649.

## KEHAT &amp; SHACHAM 1973

Kehat, E.; Shacham, M.: Chemical process simulation programs-2: Partitioning and tearing of system flowsheets. Process Technology International 18 (1973) 3, S. 115-118.

## KELLER et al. 2005

Keller, R.; Eger, T.; Eckert, C. M.; Clarkson, P. J.: Visualising Change Propagation. In: Samuel, A. et al. (Hrsg.): Proceedings the 15th International Conference on Engineering Design (ICED'05), Melbourne, Australia, 15.-18.08.2005. Melbourne: The Design Society 2005.

## KERZNER 2009

Kerzner, H.: Project Management: A systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. 10. Auflage. Hoboken: John Wiley & Sons 2009.

## KLEEDÖRFER 1999

Kleedörfer, R.: Prozes- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung. Aachen: Shaker 1999. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 1998.

## KLEINER 2003

Kleiner, S.: Föderatives Informationsmodell zur Systemintegration für die Entwicklung mechatronischer Produkte. Shaker, Aachen (2003). Zugl. Darmstadt: Technische Universität, Diss. 2003.

## KO et al. 2009

Ko, R. K. L.; Lee, S. S. G.; Lee, E. W.: Business process management (BPM) standards: a survey. Business Process Management Journal 15 (2009) 5, S. 744-791.

## KÖHLER 2009

Köhler, C. M.: Technische Produktänderungen – Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, Diss. 2009.

## KOLLER 1998

Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. 4. Auflage. Berlin: Springer 1998.

## KOMOTO &amp; TOMIYAMA 2010

Komoto, H.; Tomiyama, T.: Computational Support for System Architecting. In: Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2010), Montreal, Canada, 15.-18.08.2010. Montreal: ASME 2010.

## KORTLER et al. 2010

Kortler, S.; Helms, B.; Berkovich, M.; Lindemann, U.; Shea, K.; Leimeister, J. M.; Krcmar, H.: Using MDM-methods in order to improve managing of iterations in design processes. In: Wynn, D. C. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International DSM Conference (DSM'10), Cambridge, UK, 22.-23.07.2010, S. 125-138. München: Hanser 2010.

## KORTLER et al. 2009

Kortler, S.; Kreimeyer, M.; Lindemann, U.: A Planarity-Based Complexity Metric. In: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09), Stanford, California, 24.-27.08.2009, S. 6/31-6/42. Stanford University: CDR, The Design Society 2009.

## KOSSIAKOFF et al. 2011

Kossiakoff, A.; Sweet, W. N.; Seymour, S.; Biemer, S. M.: Systems Engineering - Principles and Practice. 2. Auflage. Hoboken: Wiley 2011.

## KRAUSE et al. 2004

Krause, F. L.; Kind, C.; Voigtsberger, J.: Adaptive modelling and simulation of product development processes. CIRP Annals-Manufacturing Technology 53 (2004) 1, S. 135-138.

## KREIMEYER 2010

Kreimeyer, M. F.: A Structural Measurement System for Engineering Design Processes. München: Dr. Hut 2010. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2009.

## KREMPEL 2005

Krempel, L.: Visualisierung komplexer Strukturen: Grundlagen der Darstellung mehrdimensionaler Netzwerke Frankfurt a.M.: Campus Verlag 2005.

## KRISHNAN &amp; ULRICH 2001

Krishnan, V.; Ulrich, K. T.: Product Development Decisions: A Review of the Literature. Management Science 47 (2001) S. 1-21.

## KRUCHTEN 2004

Kruchten, P.: The rational unified process: an introduction. Boston: Addison-Wesley Professional 2004.

## KUSIAK 1999

Kusiak, A.: Engineering design - Products, Processes and Systems. San Diego: Academic Press 1999.

## LANGER et al. 2010

Langer, S.; Herberg, A.; Körber, K.; Lindemann, U.: Development of an explanatory model of cycles within development processes by integrating process and context perspective. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM'10), Macao, China, 7.-10.12.2010, S. 1796-1800. Macao: IEEE 2010.

## LANGER et al. 2011

Langer, S.; Herberg, A.; Körber, K.; Lindemann, U.: Integrated system and context modeling of iterations and changes in development processes. In: Culley, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED'11), Copenhagen, Denmark, 15.-18.08.2011, S. 499-508. Lyngby: Technical University of Denmark, The Design Society 2011.

## LANNER &amp; MALMQVIST 1996

Lanner, P.; Malmqvist, J.: An approach towards considering technical and economic aspects in product architecture design. In: Kleimola, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International NordDesign Seminar on Engineering Design (NordDesign'96), Espoo, Finland, 28.-30.8.1996, S. 28-30. Helsinki: Helsinki University of Technology 1996.

## LARSES &amp; ADAMSSON 2004

Larses, O.; Adamsson, N.: Drivers for model based development of mechatronic systems. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Design Conference (DESIGN'04), Dubrovnik, Croatia, 18.-21.05.2004. Glasgow: The Design Society 2004.

## LAUER 2010

Lauer, W.: Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen. München: Dr. Hut 2010. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2010.

## LEHMANN 2008

Lehmann, F. R.: Integrierte Prozessmodellierung mit ARIS. Heidelberg: dpunkt 2008.

## LÉVÁRDY &amp; BROWNING 2009

Lévárdy, V.; Browning, T. R.: An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management. IEEE Transactions on Engineering Management 56 (2009) 4, S. 600-620.

## LINCKE 1995

Lincke, W.: Simultaneous Engineering: Neue Wege zu überlegenen Produkten. München: Hanser 1995.

## LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Auflage. München: Springer 2009.

## LINDEMANN et al. 2010

Lindemann, U.; Biedermann, W.; Hellenbrand, D.: Anwendung von Systems Engineering in der integrierten Produktentwicklung. Newsletter Berliner Kreis - Mitteilungen des Berliner Kreises 2/2010 (2010), S. 9-10.

## LINDEMANN et al. 2008

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design. Berlin: Springer 2008.

## LIPPOLD 2001

Lippold, C.: Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Aachen: Shaker 2001. Zugl. Bochum: Ruhr-Universität, Diss. 2000.

LÜCKEL et al. 2001

Lückel, J.; Hestermeyer, T.; Liu-Henke, X.: Generalization of the cascade principle in view of a structured form of mechatronic systems. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'01), Como, Italy, 8.-12.07.2001. Piscataway, NJ: IEEE 2001.

LÜCKEL et al. 2000

Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: VDI-Tagung Mechatronik - Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik, Wiesloch, 29.-30.03.2000. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

LÜDECKE 2003

Lüdecke, A.: Simulationsgestützte Verfahren für den Top-Down-Entwurf heterogener Systeme. Essen: Universität Duisburg-Essen, Diss. 2003.

LUTZ & WENDT 1998

Lutz, H.; Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik. Frankfurt a.M.: Verlag Harri Deutsch 1998.

MACCORMACK et al. 2010

MacCormack, A.; Baldwin, C. Y.; Rusnak, J.: The Architecture of Complex Systems: Do Core-periphery Structures Dominate? Working Paper 10-059. Harvard Business School 2010. [entnommen am 27.05.2011, URL: <http://www.hbs.edu/research/pdf/10-059.pdf>].

MAIER et al. 2006

Maier, A.; Kreimeyer, M.; Herfeld, U.; Deubzer, F.; Lindemann, U.; Clarkson, P. J.: Reflecting Communication: A Key Factor for Successful Collaboration between Embodiment Design and Simulation. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International Design Conference (DESIGN'06), Dubrovnik, Croatia, 15.-18.05.2006, S. 1483-1490. Glasgow: The Design Society 2006.

MALIK 2003

Malik, F.: Strategie des Managements komplexer Systeme. Bern: Haupt 2003.

MANSON 2001

Manson, S. M.: Simplifying complexity: a review of complexity theory. Geoforum 32 (2001) 3, S. 405-414.

MARTI 2007

Marti, M.: Complexity Management: Optimizing Product Architecture of Industrial Products. Wiesbaden: Gabler Verlag 2007. Zugl. St. Gallen: Universität, Diss. 2007.

MAUDERER 2011

Mauderer, M.: Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen - am Beispiel von starren Fertigungssystemen. München: Technische Universität, Diss. 2011.

MAURER & BRAUN 2008

Maurer, M.; Braun, T.: The Why-Matrix. In: Kreimeyer, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference (DSM'08), Stockholm, Sweden, 11.-12.11.2008. München: Hanser 2008.

## MAURER 2007

Maurer, M. S.: Structural awareness in complex product design. München: Dr. Hut 2007. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

## MEERKAMM et al. 2009

Meerkamm, H.; Henrich, A.; Jablonski, S.; Krcmar, H.; Lindemann, U.; Rieg, F. (Hrsg.): Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung: Prozesse - Daten - Navigation. Aachen: Shaker 2009.

## METZLER &amp; SHEA 2010

Metzler, T.; Shea, K.: Cognitive Products: Definition and Framework. In: Marjanović, D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Design Conference (DESIGN'10), Dubrovnik, Croatia, 17.-20.05.2010, S. 865-874. Glasgow: The Design Society 2010.

## MICHELS 2006

Michels, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt-und Produktionssystemkonzeptionen. Paderborn: Universität, Diss. 2006.

## MIKADO 2009

MIKADO: Verbundprojekt MIKADO. Mechatronik-Kooperationsplattform für anforderungsgesteuerte Prüfung und Diagnose - Abschlussbericht. [entnommen am 14.09.2011, URL: [http://www.transmechatronic.de/uploads/tx\\_vitramemberadmin/literature/MIKADO-Abschlussbericht.pdf](http://www.transmechatronic.de/uploads/tx_vitramemberadmin/literature/MIKADO-Abschlussbericht.pdf)]

## MITTELSTRAß 2003

Mittelstraß, J.: Transdisziplinarität - wissenschaftliche Zukunft und institutionelle Wirklichkeit. Konstanz: Universitätsverlag Konstanz 2003.

## MOCKO et al. 2007

Mocko, G. M.; Fadel, G. M.; Summers, J. D.; Maier, J.; Ezhilan, T.: A systematic method for modelling and analysing conceptual design information. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International DSM Conference (DSM'07), München, 11.-12.11.2007, S. 297-310. Aachen: Shaker 2007.

## MÖHRINGER 2004

Möhringer, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2004. Zugl. Paderborn: Universität, Habil. 2004.

## MORGAN &amp; LIKER 2006

Morgan, J. M.; Liker, J. K.: The Toyota product development system: integrating people, process, and technology. New York: Productivity Press 2006.

## MÜLLER 2007

Müller, M.: Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am besonderen Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, Diss. 2007.

## NASA 2007

NASA: (National Aeronautics and Space Administration): Systems Engineering Handbook. [entnommen am 08.03.2012, URL: [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080008301\\_2008008500.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080008301_2008008500.pdf)].

## OMG 2010

OMG (Objekt Management Group): OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) Version 1.2. [entnommen am 14.03.2012, URL: <http://www.sysml.org/docs/specs/OMGSysML-v1.2-10-06-02.pdf>]

## OTTO &amp; WOOD 2001

Otto, K.; Wood, K.: Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Design. Uppder Saddle River: Prentice Hall 2001.

## PAHL et al. 2007

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Berlin: Springer 2007.

## PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin: Springer 1982.

## PERRIN 2010

Perrin, K.: Mechatronische Produktentwicklung mit Digital Prototyping. Autodesk White Paper. [entnommen am 14.09.2011, URL: [http://www.cinteg.de/de/branchen/enabling\\_mechatronics\\_whitepaper\\_de.pdf](http://www.cinteg.de/de/branchen/enabling_mechatronics_whitepaper_de.pdf)].

## PFEIFER-SILBERBACH 2005

Pfeifer-Silberbach, U.: Ein Beitrag zum Monitoring des Reifegrades in der Entwicklung eines Produktes. Aachen: Shaker 2005. Zugl. Darmstadt: Technische Universität, Diss. 2005.

## PIMMLER &amp; EPPINGER 1994

Pimmler, T. U.; Eppinger, S. D.: Integration Analysis of Product Decompositions. In: Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, September 1994, S. 343-351. Minneapolis, USA: ASME 1994.

## PLATZ &amp; SCHMELZER 1986

Platz, J.; Schmelzer, H. J.: Projektmanagement in der industriellen Forschung und Entwicklung. Berlin: Springer 1986.

## PMI 2008

PMI (Project Management Institute): A guide to the project management body of knowledge. 4. Auflage. Pennsylvania: Project Management Institute 2008.

## PONN 2007

Ponn, J.: Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte. München: Dr. Hut 2007. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

## PONN &amp; LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Auflage. Berlin: Springer 2011.

## PRODUKTENTWICKLUNG 2011a

Bründl, Matthias: Entwurf und Konstruktion einer Pedalerieeinheit eines elektrisch angetriebenen GoKarts. Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2578. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2011.

## PRODUKTENTWICKLUNG 2011b

Fella, Lukas: Entwurf und Konstruktion eines mechatronischen Bremssystems für ein elektrisch angetriebenes GoKart. Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2577. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2011.

## PRODUKTENTWICKLUNG 2011c

Lachner, Benjamin: Entwicklung und Realisierung eines Anzeige- und Bediengerätes sowie Umsetzung des schrittweisen Aufbaus des zentralen Steuergerätes für ein Elektro-Kart. Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2576. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2011.

## PRODUKTENTWICKLUNG 2011d

Thumann, Johannes: Systematische Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Partitionierungsansätze in der Mechatronik. Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2649. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2011.

## PRODUKTENTWICKLUNG 2011e

Völgy, Franciska: Entwicklung eines Systems zur Modellierung und Reifegradbestimmung mechatronischer Produkte. Unveröffentlichte Bachelorarbeit Nr. 18. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2011.

## PROSTEP 2009

ProSTEP: ProStEP iViP Mechatronic Process Integration (MPI) - Abschlussbericht. - [entnommen am 03.12.2010, URL: <http://www.prostep.org/de/mediathek/veroeffentlichungen/projektabschlussberichte.html>].

## PUHL 1999

Puhl, H.: Komplexitätsmanagement: Ein Konzept zur ganzheitlichen Erfassung, Planung und Regelung der Komplexität in Unternehmensprozessen. Kaiserslautern: Universität, Diss. 1999.

## PULM 2004

Pulm, U.: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. München: Dr. Hut 2004. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2004.

## PULS 2003

Puls, C.: Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zum Management von Konfigurationswissen in KMU. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. Zugl. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, Diss. 2002.

## REDENIUS 2006

Redenius, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Paderborn: Universität, Diss. 2006.

## REICHART 2005

Reichart, G.: Systems - Engineering - ein neues Entwicklungsparadigma in der Automobilindustrie? In: 9. EUROFORUM Tagung Elektronik-Systeme im Automobil, München, 2005. München: EUROFORUM 2005.

## REIFSCHNEIDER 1998

Reifschneider, N.: CAE-gestützte IC-Entwurfsmethoden. Upper Saddle River: Prentice Hall 1998.



REIK et al. 2011

Reik, A. U.; Weiß, S.; Lindemann, U.: Lean Monitoring Card - Ein Ansatz zur mehrperspektivischen Erfolgsbeurteilung von verschwendungsreduzierenden Maßnahmen im Rahmen von Lean Development. CIDaD Working Paper Series 07 (2011) 01, S. 1-12.

RIEPE 2003

Riepe, B.: Integrierte Produktstrukturmodellierung in den frühen Phasen der Produktentstehung. Eine Methode zur Modularisierung variantenreicher mechatronischer Produkte. Norderstedt: Books on Demand 2003. Zugl. Paderborn: Universität, Diss. 2003.

ROELOFSEN 2011

Roelofsen, J. M. K.: Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen. München: Dr. Hut 2011. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2011.

ROOZENBURG & EEKELS 1995

Roozenburg, N. F.; Eekels, J.: Product Design: fundamentals and methods. Chichester: John Wiley & Sons 1995.

ROPOHL 1975

Ropohl, G.: Einführung in die Systemtechnik - Grundlagen und Anwendungen. München: Hanser 1975.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. 3. Auflage. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009.

ROTH 2000

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Konstruktionslehre. Berlin: Springer 2000.

ROUIBAH & CASKEY 2003

Rouibah, K.; Caskey, K. R.: Change management in concurrent engineering from a parameter perspective. Computers in Industry 50 (2003) 1, S. 15-34.

SAGE & ROUSE 2009

Sage, A. P.; Rouse, W. B.: Handbook of Systems Engineering and Management. Hoboken: Wiley 2009.

SALMINEN & VERHO 1992

Salminen, V.; Verho, A.: Systematic and innovative design of a mechatronic product. Mechatronics 2 (1992) 3, S. 257-275.

SCHARFENBERGER et al. 2009

Scharfenberger, C.; Daniilidis, C.; Fischer, M.; Hellenbrand, D.; Kuhl, P.; Richter, C.; Sabbah, O.; Stolz, M.; Färber, G.: Multidisziplinäre Entwicklung von neuen Türkonzepten als ein Teil einer ergonomisch optimierten Ein-/Ausstiegsunterstützung. In: OEM Forum Fahrzeugtüren und -klappen 2009, Sindelfingen, 13.-14.05.2009, S. 65 - 80. Düsseldorf: VDI-Verlag 2009.

SCHMELZER & SESSELMANN 2008

Schmelzer, H. J.; Sesselmann, W.: Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. 6. Auflage. München: Hanser 2008.

## SCHÖN 2000

Schön, A.: Konzept und Architektur eines Assistenzsystems für die mechatronische Produktentwicklung. Erlangen: Technische Universität Erlangen-Nürnberg, Diss. 2000.

## SCHÖNER 2006

Schöner, H. P.: Mechatronik. In: Gevatter, H.-J. et al. (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil, S. 9-21. Berlin: Springer 2006.

## SCHUH et al. 2009

Schuh, G.; Lenders, M.; Maletz, L.; Uam, J.; Nussbaum, C.; Müller, J.; Schiffer, M.; v. Dombrowski, R.; Verkoyen, T.; Meuser, M.; Kamizuru, Y.: Leitfaden für die integrative Entwicklung fluidtechnisch-mechatronischer Systeme. Aachen: RWTH Aachen 2009.

## SCHUH &amp; SCHWENK 2001

Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen: Strategien, Methoden, Tools. München: Hanser 2001.

## SELL 2007

Sell, R.: Model Based Mechatronic Systems Modeling Methodology in Conceptual Design Stage. Tallin: Tallin University of Technology, Diss. 2007.

## SHEN &amp; GRAFE 2007

Shen, Q.; Grafe, M.: To support multidisciplinary communication in VR-based virtual prototyping of mechatronic systems. *Advanced Engineering Informatics* 21 (2007) 2, S. 201-209.

## SÖDERLUND 2004

Söderlund, J.: Building theories of project management: past research, questions for the future. *International Journal of Project Management* 22 (2004) 3, S. 183-191.

## SOSA et al. 2005

Sosa, M. E.; Agrawal, A.; Eppinger, S. D.; Rowles, C. M.: A Network Approach to Define Modularity of Product Components. In: *Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2005)* Long Beach, California, 24.-28.09.2005, S. 435-446. Long Beach, USA: ASME 2005.

## SOSA et al. 2004

Sosa, M. E.; Eppinger, S. D.; Rowles, C. M.: The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development. *Management Science* 50 (2004) 12, S. 1674-1689.

## SOSA et al. 2007

Sosa, M. E.; Rowles, C. M.; Eppinger, S. D.: Are your engineers talking to another when they should? *Harvard Business Review* November 2007 (2007) S. 133-142.

## STARK et al. 2010

Stark, R.; Beier, G.; Wöhler, T.; Figge, A.: Cross-Domain Dependency Modelling - How to achieve consistent System Models with Tool Support. In: *Proceedings of the 7th European Systems Engineering Conference (EuSEC'07)*, Stockholm, Sweden, 23.-26.05.2010. Stockholm: INCOSE 2010.

## STEFFEN 2006

Steffen, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Paderborn: Universität, Diss. 2006.

## STEFFEN &amp; JILG 2009

Steffen, D.; Jilg, K.: Kundenorientierte Produktentwicklung. AUTOMOBIL-ELEKTRONIK Juni 2009 (2009), S. 56-58.

## STEINMEIER 1999

Steinmeier, E.: Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells - Einsatz in der Pkw-Entwicklung. Aachen: Shaker 1999. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 1998.

## STETTER 2008

Stetter, R.: Mechatronik – was folgt der Sensibilisierung? Computer & Automation 3 (2008), S. 22-27.

## STEWARD 1962

Steward, D. V.: On an approach to techniques for the analysis of the structure of large systems of equations. Siam Review 5 (1962) 4, S. 321-342.

## STEWARD 1981

Steward, D. V.: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management 28 (1981) 3, S. 79-83.

## STÖGER 2009

Stöger, R.: Prozessmanagement - Qualität, Produktivität, Konkurrenzfähigkeit. 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2009.

## SUH 1998

Suh, N. P.: Axiomatic design theory for systems. Research in Engineering Design 10 (1998) 4, S. 189-209.

## SUKOPP 2010

Sukopp, T.: Interdisziplinarität und Transdisziplinarität. Definitionen und Konzepte. In: Jungert, M. et al. (Hrsg.): Interdisziplinarität. Theorie, Praxis, Probleme, S. 13-29. Darmstadt: WGB 2010.

## SUMMERS &amp; SHAH 2010

Summers, J. D.; Shah, J. J.: Mechanical engineering design complexity metrics: size, coupling, and solvability. Journal of Mechanical Design 132 (2010) S. 021004-1 - 021004-11.

## TESEON 2012

Teseon: TESEON - Startseite. [URL: <http://www.teseon.de>]

## THRAMBOULIDIS 2008

Thramboulidis, K.: Challenges in the development of mechatronic systems: The mechatronic component. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'08), Hamburg, 15.-18.09.2008, S. 624-631. Hamburg: IEEE 2008.

## ULRICH 1995

Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy* 24 (1995) 3, S. 419-440.

## ULRICH &amp; EPPINGER 2003

Ulrich, K.; Eppinger, S.: *Product Design and Development*. 3. Auflage. New York: McGraw-Hill 2003.

## UMEDA &amp; TOMIYAMA 1995

Umeda, Y.; Tomiyama, T.: FBS Modeling: Modeling Scheme of Function for Conceptual Design. In: *Proceedings of the 9th International Workshop on Qualitative Reasoning About Physical Systems*, Amsterdam, The Netherlands, 16.-19.05.1995, S. 271-278. Amsterdam: University of Amsterdam 1995.

## VAJNA 2005

Vajna, S.: Workflow for design. In: Clarkson, J. et al. (Hrsg.): *Design process improvement: A review of current practice*, S. 366-385. London: Springer 2005.

## VAN BEEK et al. 2010

van Beek, T. J.; Erden, M. S.; Tomiyama, T.: Modular design of mechatronic systems with function modeling. *Mechatronics* 20 (2010) 8, S. 850-863.

## VAN BRUSSEL 1996

van Brussel, H. M. J.: Mechatronics - a powerful concurrent engineering framework. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1 (1996) 2, S. 127-136.

## VAN DER AALST &amp; VAN HEE 2004

van der Aalst, W.; van Hee, K. M.: *Workflow management: models, methods, and systems*. Cambridge, MA: The MIT Press 2004.

## VDI 1993

VDI - Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte (VDI-Richtlinie 2221)*. Berlin: Beuth 1993.

## VDI 1997

VDI - Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien (VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1)*. Berlin: Beuth 1997.

## VDI 2004

VDI - Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI-Richtlinie 2206)*. Berlin: Beuth 2004.

## VDI/VDE 1994

VDI/VDE - Verein Deutscher Ingenieure / Verband Deutscher Elektrotechniker (Hrsg.): *Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerungen durch Mikroelektronik (VDI/VDE-Richtlinie 2422)*. Berlin: Beuth 1994.

## VERSTEEGEN 2000

Versteegen, G.: *Das V-Modell in der Praxis*. Heidelberg: dpunkt 2000.

## VOIGTSBERGER 2005

Voigtsberger, J.: *Adaptive Modellierung und Simulation von Produktentwicklungsprozessen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005. Zugl. Berlin: Universität, Diss. 2005.

## VON BERTALANFFY 1950

von Bertalanffy, L.: An outline of general system theory. *British Journal for the Philosophy of Science* 1 (1950) 2, S. 134-165.

## WALKER &amp; THOMAS 1985

Walker, R. A.; Thomas, D. E.: A model of design representation and synthesis. In: Ofek, H. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 22nd ACM/IEEE conference on Design Automation (DAC'85)*, Las Vegas, Nevada, 23.-26.06.1985, S. 453-459. Piscataway, NJ: IEEE Press 1985.

## WALLASCHEK &amp; KÜMMEL 1997

Wallaschek, J.; Kümmel, M.: *Mechatronik - Neue Impulse für die Produktentwicklung*. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): *TransMechatronik - Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik*. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 1997.

## WALTHER 2001

Walther, C.: *Systemtechnische Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionen großer Systeme*. München: Utz 2001.

## WARFIELD 1973

Warfield, J. N.: Binary matrices in system modeling. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3 (1973) 5, S. 441-449.

## WARKENTIN 2010

Warkentin, A.: *Systematik zur funktionsorientierten Modellierung von Elektrik/Elektronik-Systemen über den Produktlebenszyklus*. Paderborn: Universität, Diss. 2010.

## WEBER 2005a

Weber, C.: CPM/PDD - An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In: Bley, H. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes*, Berlin, 07.-08.07.2005, S. 159-179. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

## WEBER 2005b

Weber, C.: What Is "Complexity"? In: Samuel, A. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED'05)*, Melbourne, Australia, 15.-18.08.2005. Melbourne: The Design Society 2005.

## WEILKIENS 2008

Weilkiens, T.: *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design*. 2. Auflage. Heidelberg: dpunkt 2008.

## WEINZIERL 2006

Weinzierl, J.: *Produktreifegrad-Management in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken - Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Anlaufmanagement*. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2006. Zugl. Dortmund: Universität, Diss. 2006.

## WERTH 2007

Werth, D.: *Modellierung unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse: Modelle, Notationen und Vorgehen für prozessorientierte Unternehmensverbände*. Bremen: Europäischer Hochschulverlag 2007.

## WHITNEY 1996

Whitney, D. E.: Why mechanical design cannot be like VLSI design. *Research in Engineering Design* 8 (1996) 3, S. 125-138.

## WILLIAMS 2005

Williams, T.: Assessing and moving on from the dominant project management discourse in the light of project overruns. *IEEE Transactions on Engineering Management* 52 (2005) 4, S. 497-508.

## WIBLER 2006

Wißler, F. E.: Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte. Heimsheim: Jost Jetter Verlag 2006. Zugl. Stuttgart: Universität, Diss. 2006

## WMC 1999

WMC (Workflow Management Coalition): Terminology & Glossary. Document Number WFMC-TC-1011. [entnommen am 04.04.2012, URL: [http://www.wfmc.org/standards/docs/TC-1011\\_term\\_glossary\\_v3.pdf](http://www.wfmc.org/standards/docs/TC-1011_term_glossary_v3.pdf)]

## WU et al. 2009

Wu, J. C.; Leu, M. C.; Liu, X. F.: A Hierarchical Object-oriented Functional Modeling Framework for Co-Design of Mechatronic Products. *Concurrent Engineering: Research and Applications* 17 (2009) 4, S. 245-256.

## WYNN 2007

Wynn, D. C.: Model-based approaches to support process improvement in complex product development. Cambridge: University of Cambridge, Diss. 2007.

## WYNN &amp; CLARKSON 2009

Wynn, D. C.; Clarkson, P. J.: Design Project Planning, Monitoring and Re-planning through Process Simulation. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Stanford, California, 24.-27.08.2009, S. 1/25-1/36. Stanford University: CDR, The Design Society 2009.

## WYNN et al. 2007

Wynn, D. C.; Eckert, C. M.; Clarkson, P. J.: Modelling Iteration in Engineering Design. In: Bocquet, J.-C. (Hrsg.): *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED'07)*, Paris, France, 28.-31.08.2007. Paris: Ecole Centrale, The Design Society 2007

## YASSINE et al. 2003

Yassine, A.; Whitney, D.; Daleiden, S.; Lavine, J.: Connectivity maps: modeling and analysing relationships in product development processes. *Journal of Engineering Design* 14 (2003) 3, S. 377-394.

## YEFIMENKO 2005

Yefimenko, Y.: Komponentenorientierte Modellierung elektrischer Systeme in der Mechatronik. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Diss. 2005.

## ZIRKLER 2010

Zirkler, S. C.: Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte. München: Dr. Hut 2010. Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2010

## **9. Anhang**

**9.1 Untersuchte Internetauftritte der Unternehmen**

**9.2 Berechnungsmöglichkeiten für indirekte Abhängigkeiten**

**9.3 Übersicht Strukturmerkmale**

**9.4 Vorgehen in der Projektplanung**

**9.5 Anforderungen an den Ansatz**

**9.6 Vollständiges Vorgehensmodell**

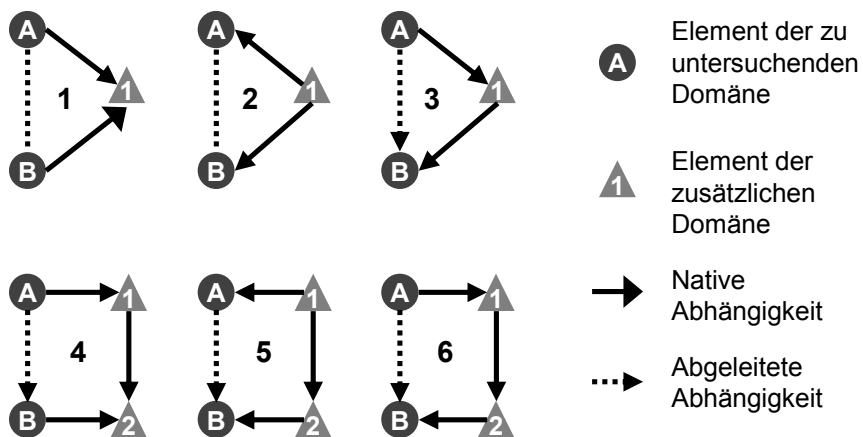
## 9.1 Untersuchte Internetauftritte der Unternehmen

- **Festo AG & Co.KG**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse: [http://www.festo.com/cms/de\\_de/index.htm](http://www.festo.com/cms/de_de/index.htm)
- **Bosch-Rexroth AG**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse: <http://www.boschrexroth.com>
- **elexis AG**  
Zugriff: 30.10.2010; Internetadresse: <http://www.elexis.de>
- **Rittal GmbH & Co. KG**  
Zugriff: 30.10.2010; Internetadresse: <http://www.rittal.de>
- **Knorr Bremse AG**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse: <http://www.knorr-bremse.de/de>
- **Siemens AG**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse:  
[http://www.siemens.de/aktuelles/Seiten/aktuelles\\_home.aspx](http://www.siemens.de/aktuelles/Seiten/aktuelles_home.aspx)
- **Seidenader Maschinenbau GmbH**  
Zugriff: 01.11.2010; Internetadresse: <http://www.seidenader.de>
- **TRUMPF GmbH + Co. KG**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse: <http://www.de.trumpf.com>
- **Kuhn Maschinentechnik GmbH & Co. KG**  
Zugriff: 01.11.2010; Internetadresse: <http://www.kuhn-maschinentechnik.de>
- **SPINNER Werkzeugmaschinenfabrik GmbH**  
Zugriff: 30.10.2010; Internetadresse: <http://www.spinner-wzm.de>
- **maxon motor GmbH**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse: <http://www.maxonmotor.de>
- **Weidmüller GmbH & Co. KG**  
Zugriff: 29.10.2010; Internetadresse: <http://www.weidmueller.de>

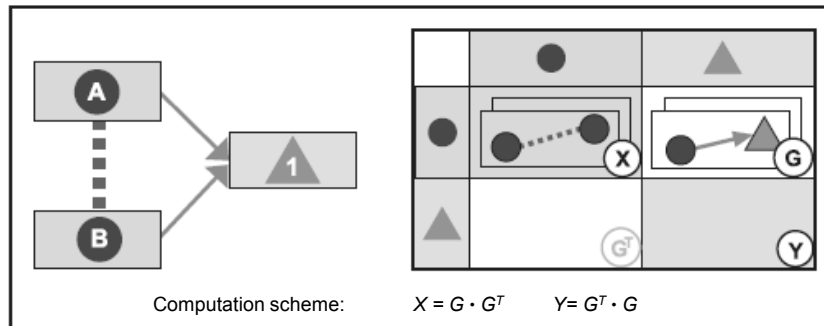
Quelle: nach [PRODUKTENTWICKLUNG 2011d, S.11]



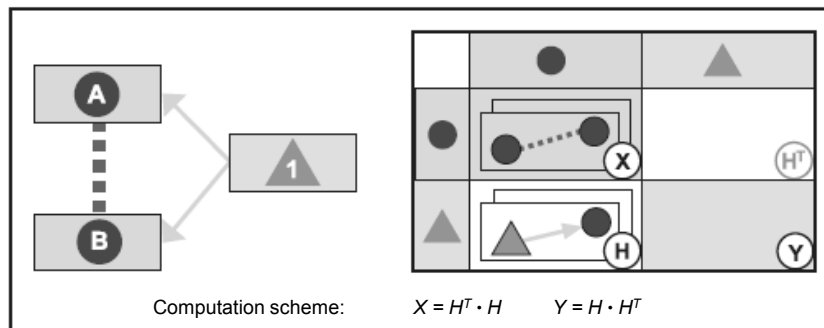
## 9.2 Berechnungsmöglichkeiten für indirekte Abhängigkeiten



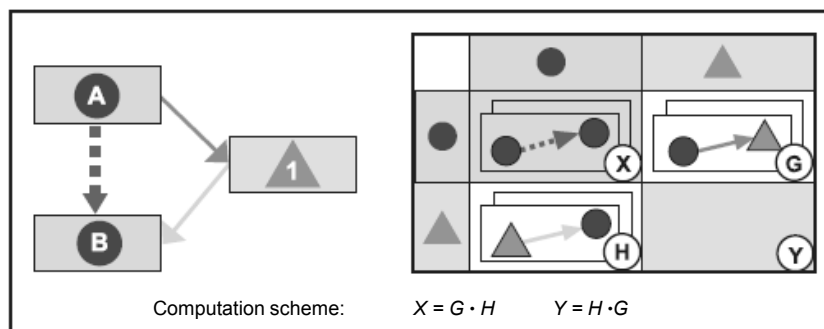
Quelle: nach [LINDEMANN et al. 2008, S.198]



Fall 1: DSM abgeleitet aus einer DMM

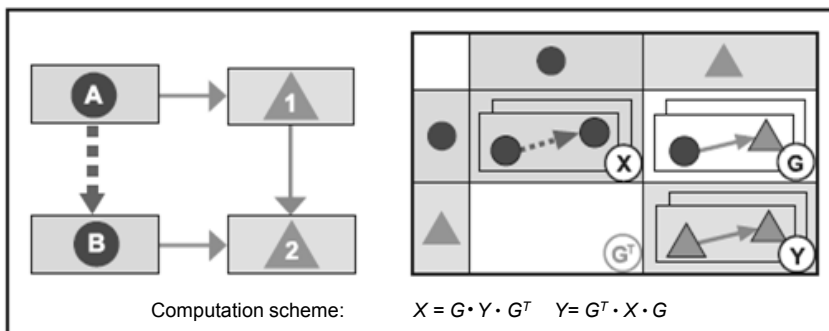


Fall 2: DSM abgeleitet aus einer DMM

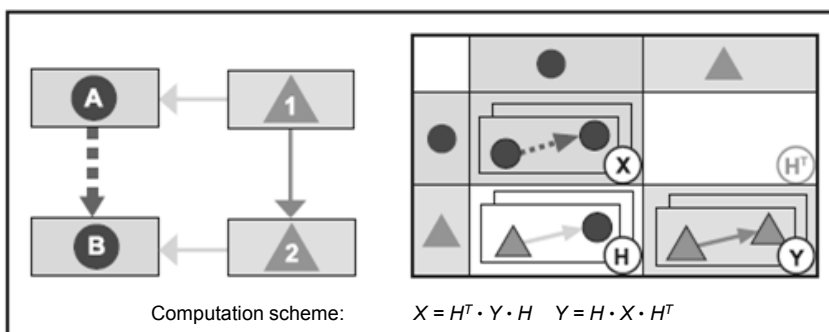


Fall 3: DSM abgeleitet aus zwei DMMs

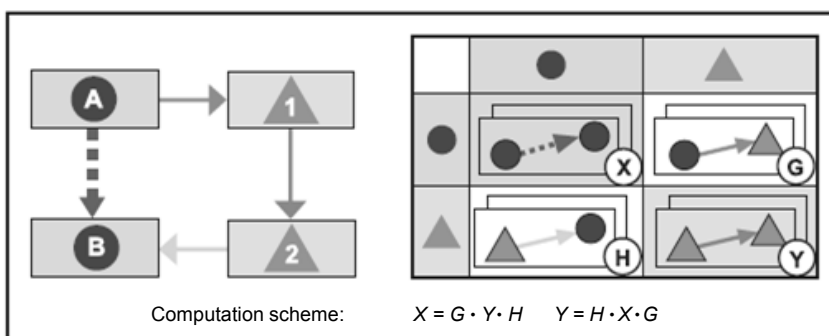
Quelle: nach [LINDEMANN et al. 2008, S.199]



Fall 4: DSM abgeleitet aus einer DMM und einer DSM



Fall 5: DSM abgeleitet aus einer DMM und einer DSM



Fall 6: DSM abgeleitet aus zwei DMMs und einer DSM

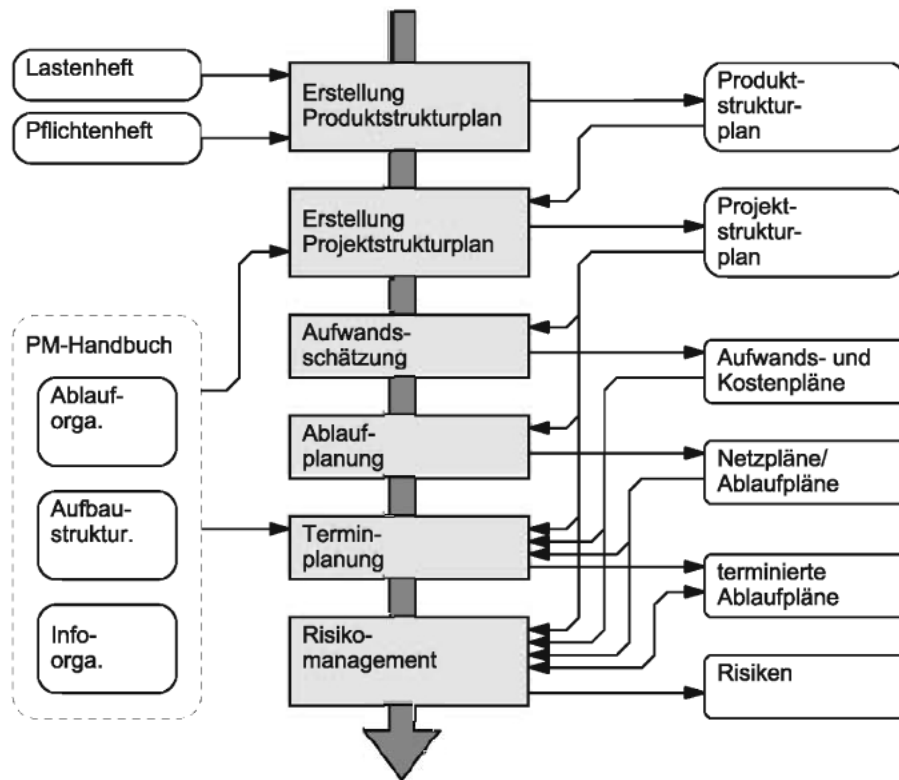
Quelle: [LINDEMANN et al. 2008, S.200]

### 9.3 Übersicht Strukturmerkmale

Knoten und Kanten	Teilsysteme	Systeme
Aktivsumme	Doppeltverbundene Komponente	Banding
Aktivität	Cluster	Clustern
Gelenkknoten	Distanz	Vernetzungsgrad
Erreichbarkeit	Rückkopplung	Distanzmatrix
Brückenkante	Hierarchie	Matrix indirekter Abhängigkeiten
Bus	Umgebung	Triangularisierung
Nähe	Pfad	
Kritikalität	Menge indirekter Abhängigkeiten	
Endknoten	Ähnlichkeit	
Isolierter Knoten	Spannbaum	
Blattknoten	Stark verknüpfte Teilsysteme	
Passivsumme		
Startknoten		
Transitknoten		

Quelle: nach [LINDEMANN et al. 2008]

## 9.4 Vorgehen in der Projektplanung



Quelle: [JAKOBY 2010, S.121]

## 9.5 Anforderungen an den Ansatz

### Rahmenbedingungen

Rahmenbedingungen und Voraussetzungen
Fokussierung auf Serienentwicklungsprozesse
Unterstützung der Phase des domänenpezifischen Entwurfs
Unterstützung der Phase der Systemintegration
Lösungsprinzip bzw. Architektur des technischen Systems sind bekannt
Notwendige Entwicklungsschritte sind bekannt
Einheitlicher mechatronischer Entwicklungsprozesses wird nicht angestrebt
Disziplinspezifische Entwicklungsprozesse sollen nicht angepasst bzw. optimiert werden
Keine Erstellung einer modellbasierten, disziplinübergreifenden Systemmodellierung

### Grundlegende Anforderungen

Bewertung: x: erfüllt      (x): teilweise erfüllt      -: nicht erfüllt bzw. adressiert

	Anforderung	Bewertung
<b>Allgemeine Zielsetzungen</b>	Ermöglichung einer transdisziplinären und funktionsorientierten Entwicklung	x
	Unterstützung der transdisziplinären Prozessplanung	x
	Unterstützung der transdisziplinären Synchronisation	x
	Unterstützung bei der Erstellung von Team- und Kommunikationsstrukturen	x
	Unterstützung eines domänenübergreifenden Änderungsmanagements	x
	Integrative Betrachtung von technischem System und Entwicklungsprozess	x
	Berücksichtigung von Änderungsabhängigkeiten in Produkt und Prozess	x
	Verminderung von Iterationen im Entwicklungsprozess	(x)
	Steigerung von Effizienz und Effektivität	(x)
	Erhöhung der Transparenz in Produkt und Prozess	x
	Verminderung der Komplexität	x
	Strukturierung des Entwicklungsprozesses	x
	Durchgängigkeit der Methode über alle Prozessphasen	x
	Erfassung und Darstellung des Entwicklungsfortschrittes (Reifegrade)	(x)
	Hohe Akzeptanz bei Anwendern	(x)
	Einfache Anwendbarkeit der Methodik	(x)
	Strukturmanagement (keine weitere Belastung für Entwickler)	x
Keine Einschränkung der Änderungsdynamik im Unternehmen	x	
Unterstützung der kontinuierlichen Verbesserung für Nachfolgeprozesse	x	
<b>Ausrichtung auf Mechatronik</b>	Berücksichtigung der Transdisziplinärität und Heterogenität	x
	Unterstützung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit	x
	Berücksichtigung disziplinspezifischer Sichtweisen	x
	Ermöglichung der Anpassbarkeit und des Wechsels der Sichtweisen	x
	Integration disziplinspezifischer Vorgehensweisen	x
	Berücksichtigung der Heterogenität der Entwicklungsprozesse (Änderungsdynamik, Iterationsanzahl und -dauer, Anzahl Prototypen, ...)	x
	Transdisziplinärer Austausch von Informationen durch domänenübergreifende Beschreibung bzw. Darstellung	x
	Schaffung von Akzeptanz durch Integration bewährter Vorgehen	x

	Anforderung	Bewertung
<b>Unternehmens und Brancheneinflüsse</b>	Universell einsetzbarer Ansatz, unabhängig von Produkt- und Branche	x
	Unabhängigkeit von vorhandenen Entwicklungsprozessen	x
	Unabhängigkeit von vorhandenen Organisationen (Struktur und Einheiten)	x
	Anwendbarkeit in unternehmensspezifischen Anwendungsfällen	x
	Möglichkeit zur Integration spezifischen Entwicklungsprozesse	x
<b>Phase im Prozess</b>	Grundsätzliche Anwendbarkeit in allen Prozessphasen	(x)
	Phasenneutrale Beschreibung	x
	Unterstützung von Serienentwicklungsprozessen	x
	Fokussierung auf domänenspezifischen Entwurf und Systemintegration	x
	Detailliertere Betrachtung im Vergleich zu Vorgehensmodellen	x
	Planung der disziplinspezifischen Prozesse und deren Schnittstellen	x
<b>Integrierte Produkt und Prozessbetrachtung</b>	Integrative Betrachtung von Produkt und Entwicklungsprozess über alle Prozessphasen	x
	Verknüpfung verschiedener Produkt- und Prozessstrukturen	x
	Berücksichtigung von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten in Produkt und Prozess	x
	Darstellung von technischen und organisatorischen Änderungsabhängigkeiten sowie deren Auswirkungen	x
<b>Systemorientierung</b>	Ganzheitlichen Sichtweise auf das sozio-technisches System der Produktentwicklung	x
	Domänenunabhängige, abstrakte Modellierung und Abbildung des Systems	x
	Forderung des transdisziplinären Gesamtsystemverständnisses	x
	Ermöglichung der Nachvollziehbarkeit des Gesamtsystems	x
	Berücksichtigung unterschiedler Element- und Relationsarten	x
	Flexible Vernetzung der Elemente	x
	Transparente und disziplinübergreifende Visualisierung des Systems und der Abhängigkeiten	(x)
<b>Anpassbarkeit /Flexibilität</b>	Hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit: Anpassbarkeit an geänderte Randbedingungen oder Anforderungen	(x)
	Ermöglichung einer flexiblen Reaktion auf Änderungen im laufenden Entwicklungsprozess	(x)
<b>Anwender- und Zielgruppen</b>	Berücksichtigung unterschiedlicher Ziel und Anwendergruppen: Prozessplaner, Entwickler, Verantwortliche	x
<b>Softwaretechnische Unterstützung</b>	Möglichkeit zur Rechnerunterstützung	x
	Minimierung des manuellen Aufwandes	(x)
	Rechnergestützte Modellierung des Systems	(x)
	Rechnergestützte Systemanalyse und Optimierung	(x)

## Inhaltliche Anforderungen die Unterstützung der Planung und Synchronisation

	Anforderung	Bewertung
<b>Vorgehensmodell</b>	Systematische Unterstützung der Planung und Synchronisation	x
	Unterstützung der funktionsorientierten Denkweise	x
	Modelhafte, abstrahierende Beschreibung des Vorgehens	x
	Abbildung aller wesentlichen Schritte zur Zielerreichung	x
	Systematische Führung des Anwenders (Vorgehensplanung)	x
	Einzelelemente sinnvoll und übersichtlich verbinden	x
	Durchgängige Darstellung des Ansatzes	x
	Aufzeigen aller Beteiligten und Verantwortlichen	x
	Universelle Anwendbarkeit für unterschiedliche Anwendungsfälle	x
	Leichte Verständlichkeit und gute Nachvollziehbarkeit	(x)
	Pragmatische, schnelle Handhabbarkeit der Methodik	(x)
	Modifizierbarkeit und Flexibilität in der Anwendung	x
	Unterstützung für Prozessplaner, Prozessbeteiligte und Verantwortliche	x
	Unterstützung bei der Modellerstellung	x
	Einfache und strukturierte Ermittlung der Prozessumfänge	x
	Berücksichtigung der Erfassbarkeit von Informationen	x
	Unterstützung bei der Definition eines geeigneten Detaillierungsgrades	(x)
	Ermöglichung einer Konsistenzprüfung	x
	Unterstützung bei der Interpretation von Modellen und Daten	x
	Methodische Unterstützung der Analyse der Systemstruktur	x
	Bereitstellung von Hilfsmittel (Regeln, Handlungshilfen, Strategien)	x
	Wissensspeicherung von Planungs-/Entwicklungserfahrungen	(x)
	Dokumentation von Änderungen	x
	Softwaretechnische Unterstützbarkeit	x
<b>Unterstützung der Planung</b>	Frühzeitige und transparenten Planung der disziplinspezifischen Entwicklungsprozesses	x
	Integrative Erstellung eines abgestimmten, domänenübergreifenden Sollprozesses	x
	Schaffung eines domänenübergreifenden Problem- und Zielverständnisses	x
	Unterstützung einer funktionsorientierte Planung aus Kundenperspektive	x
	Strukturierung und transparente Darstellung des Entwicklungsprozesses	(x)
	Ermöglichung der Integration domänenspezifischer Entwicklungsprozesse	x
	Verminderung von Iterationen im Entwicklungsprozess	(x)
	Identifikation von potentiellen "Iterationstreibern" und Ansätzen für zeitliche Verkürzung	-
	Berücksichtigung unterschiedlicher Planungsebenen und deren Verknüpfung (Mikro- und Makrologik)	x
	Zeitliche und inhaltlich abgestimmte Definition von Ergebnis- und Entscheidungspunkten	x
	Unterstützung der Parallelisierung von Aufgaben und Teilprozessen (Concurrent- und Simultaneous Engineering)	x
	Unterstützung der Vorwärts- und Rückwärtsplanung	x
	Berücksichtigung und transparente Darstellung der zeitlichen Abhängigkeiten des transdisziplinäre Entwicklungsprozesses	x
	Unterstützung der Identifikation und Berücksichtigung von disziplinübergreifenden Abhängigkeiten in Produkt und Entwicklungsprozess	x
	Unterstützung auf Funktions-, Komponenten- und Prozessebene	x
	Identifikation disziplinübergreifender Strukturmerkmale und deren Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess	(x)
	Ermöglichung einer prozessbezogenen Sicht auf Arbeitsumfänge und Absicherungsaktivitäten	x
	Unterstützung der Integration zu einen funktionierenden und abgesicherten Gesamtsystem	x
	Unterstützung der Produktabsicherung auf mehreren Ebenen	x
	Integration von domänenspezifische Entwicklungsergebnissen zu einem funktionierenden Gesamtsystem	x
	Festlegung domänenübergreifende Reifegrade (Sollverlauf)	(x)
	Ermöglichung einer effektive und effizienten Integration zu Gesamtsystem	x
	Identifikation domänenübergreifende Wirkketten	x
	Zuweisung und transparente Darstellung von Verantwortlichkeiten im Entwicklungsprozess	x
	Grundlage für Überwachung und Steuerung des Entwicklungsprozesses	(x)



	Anforderung	Bewertung
<b>Unterstützung der Synchronisation</b>	Funktionsorientierte Synchronisation der disziplinspezifischen Entwicklungsprozesse	x
	Steigerung von Effizienz und Effektivität durch verbessertes Zusammenwirken der unterschiedlichen Disziplinen	(x)
	Integrative Identifikation und transparente Darstellung von Änderungsabhängigkeiten in Produkt und Entwicklungsprozess	x
	Berücksichtigung unterschiedlicher Produkt- und Prozessstrukturen sowie deren Abhängigkeiten	x
	Unterstützung auf Funktions-, Komponenten- und Prozessebene	x
	Visualisierung der Abhängigkeiten auf unterschiedlichen Granularitätsebenen und Detaillierungsgraden	x
	Ermöglichung unterschiedlicher Sichtweisen auf Ergebnis- und Entscheidungspunkte (Funktionen, Komponenten, Ergebnisse, Personen)	x
	Unterstützung bei der Erstellung von Team- und Kommunikationsstrukturen	x
	Transparente Darstellung, wer im Prozess wann welche Informationen in welcher Form benötigt	x
	Einfache und schnelle Anpassbarkeit in Abhängigkeit des Prozessverlaufs (schrittweise Detaillierung)	(x)
	Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit und neue bzw. geänderte Objekte und Teilprozesse ohne großen Aufwand	(x)
	Dokumentation von Entscheidungen in Bezug auf Produkt und Prozess	x
	Unterstützung der Steuerung des Entwicklungsprozesses	(x)
	Abbildung des aktuellen Entwicklungsstandes (Soll/Ist - Reifegrade)	(x)
	Darstellung der Reifegrade in Bezug auf Funktionen und Komponenten	(x)
	Frühzeitige Erkennung von Risiken (Abweichungen vom Sollablauf)	-
	Verknüpfung des Reifegrades mit erforderlichen Zeitaufwand	(x)

## Anforderungen an die Modellierung

	Anforderung	Bewertung
<b>Allgemein</b>	Vollständigkeit (Abbildung aller relevanten Aspekte)	x
	Bedarfspezifisches Produkt- und Prozessmodell unter Berücksichtigung von Aufwand und Nutzen	(x)
	Berücksichtigung von Modellierungs- und Aktualisierungsaufwand	(x)
	Schaffung eines durchgängigen Informationsmodell	x
	Redundanzfreie Abbildung aller relevanten Informationen	(x)
	Domänenneutralität	x
	Prozessneutralität (Phase, bestehender Prozess, Unternehmenskontext)	x
	Gute Visualisierbarkeit	(x)
	Ermöglichung einer leichten Navigation im Prozess	x
	Einsetzbarkeit bei gegebenen Bedingungen im Unternehmen	x
	Wieder- und Weiterverwendbarkeit früherer Produkt- und Prozessstrukturen	x
	Rechnerintegrierbarkeit (Rechnergestützte Gestaltung und Optimierung des Prozesses)	x
<b>Grundlage der Prozessunterstützung</b>	Flexible Unterstützung der Prozessplanung und Prozessdurchführung	x
	Nutzung als Kommunikations- und Planungsbasis	x
	Basis für strukturelle Analyse und Optimierung der Prozessstruktur	x
	Dokumentation von Entscheidungen in Bezug auf Produkt- und Prozessstruktur	x
	Verständlichkeit, Richtigkeit und Aktualität der Dokumentation von Entscheidungen	(x)

	Anforderung	Bewertung
<b>Domänenübergreifende Verständlichkeit</b>	Einheitliche und einfache Modellierungssprache	x
	Unabhängigkeit von disziplinspezifischen Modellen und Modellierungssprachen	x
	Einfache und domänenübergreifende Verständlichkeit	x
	Prozesskonzepte für Phasen Systementwurf, domänenspezifischen Entwurf und Systemintegration	(x)
	Ermöglichung einer domänenübergreifenden Systemspezifikation	x
	Schnelle und einfache Erfassbarkeit umfangreicher Prozessmodelle	(x)
	Erhöhung der Prozesstransparenz	x
<b>Abbildung struktureller Aspekte</b>	Verwendetes Metamodell muss sämtliche für die Planung und Synchronisation relevanter Informationen abbilden können	x
	Abbildbarkeit vorhandener Prozessmodelle	x
	Abbildung von Prozess- und Produktstrukturen	x
	Verknüpfung von Produkt- und Prozessstrukturen	x
	Konzentration auf wesentliche Informationen zum Prozessverständnis	x
	Abbildung mechatronischer Aspekte	x
	Funktionsorientierte sowie eine bauteilorientierte Sichtweise	x
	Ermöglichung der Erstellung einer logischen und physischen Systemarchitektur	x
	Beschreibung des interdisziplinären Konzeptes durch eine gemeinsame Sprache	x
	Vernetzung der Teilaspekte des Modells miteinander	x
	Transformationsregeln und -formeln zur Überführung der Teilbereiche des Modells ineinander	x
	Verbesserung der Konsistenz interdisziplinär relevanter Daten im domänenspezifischen Entwurf	(x)
	Berücksichtigung von Iterationen	(x)
	Unterstützung unstrukturierter Teilprozesse innerhalb vorgegebener Prozessstrukturen	x
	Bereitstellung von prozessbezogenem Wissen für Anwender	-
<b>Elemente / Relation</b>	Abbildung der Produktarchitektur (Funktionen, Komponenten)	x
	Abbildung der Prozessstruktur (Aktivitäten, Meilensteine, Personen)	x
	Unterstützung unterschiedlicher Element- und Relationsarten	x
	Ermöglichung der Zuweisung von Eigenschaften zu den Elementen	(x)
	Verwendung gerichteter und ungerichteter Relationen	x
	Unterschiedliche Stärken und Gewichtungen der Relationen	x
	Einfache und schnelle Manipulation von Elementen und Relationen (Hinzufügen, Entfernen, Verändern)	(x)
	Abbildung von hierarchischen und nicht-hierarchischen Strukturen	-
	Verständlichkeit für alle Prozessbeteiligten	x
	Integration domänenspezifischer Partialmodelle	x
	Möglichkeit zur Festlegung von Verantwortlichkeiten für Prozessschritte	x
	Einbeziehung etablierter Artefakte in allen Disziplinen	x
	Abbildung der mechatronischen Partitionierung	x
<b>Flexibilität und Erweiterbarkeit</b>	Firmen- und anwendungsspezifische Anpassbarkeit	x
	Gute Modifizierbarkeit und geringer Änderungsaufwand	(x)
	Erweiterbarkeit um neue Element- und Relationsarten	x
	Flexible und dynamische Anpassung in Abhängigkeit des Prozessverlaufs	(x)
	Einfache und schnelle Modellvariation	(x)
<b>Detaillierungsgrad</b>	An Aufgabenstellung orientierter Detaillierungsgrad	x
	Detaillierungsgrad für unterschiedlichen Systemstrukturen anpassbar	x
	Fortlaufenden Konkretisier- und Detaillierbarkeit	x
	Ermöglichung unterschiedlicher Granularitätsebenen und Detaillierungsgrade	x
	Flexibilität hinsichtlich Detaillierungsgrad und Abstraktionsebene	x
	Unterstützung der Produktabsicherung auf mehreren Ebenen	x
<b>Prozesscontrolling</b>	Möglichkeit zum Erfassung des Entwicklungsfortschrittes	(x)
	Monitoring des Fortschrittes anhand des Erreichens von Zwischenergebnissen	(x)
	Modellierung und Darstellung domänenübergreifende Reifegrade	(x)
	Abbildung von Reifegraden in Bezug auf Funktionen und Komponenten	(x)
	Abbildung des aktuellen Entwicklungsstandes (Soll/Ist - Reifegrade)	(x)
<b>Visualisierung</b>	Transparente und verständliche Visualisierung des Systems	x
	Übersichtlichkeit auch bei umfangreichen Modellen	(x)
	Darstellung der Systemstrukturen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen	-
	Transparente Darstellung von Abhängigkeiten in den Systemstrukturen	(x)
	Darstellung der domänenübergreifende Reifegrade	(x)

### 9.6 Vollständiges Vorgehensmodell

Im Folgenden werden die Schritte der Methodik zur Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse dargestellt. Die Nummerierung und Zuordnung der Schritte zu den verschiedenen Modulen ist im unten stehenden Bild 9-1 dargestellt.

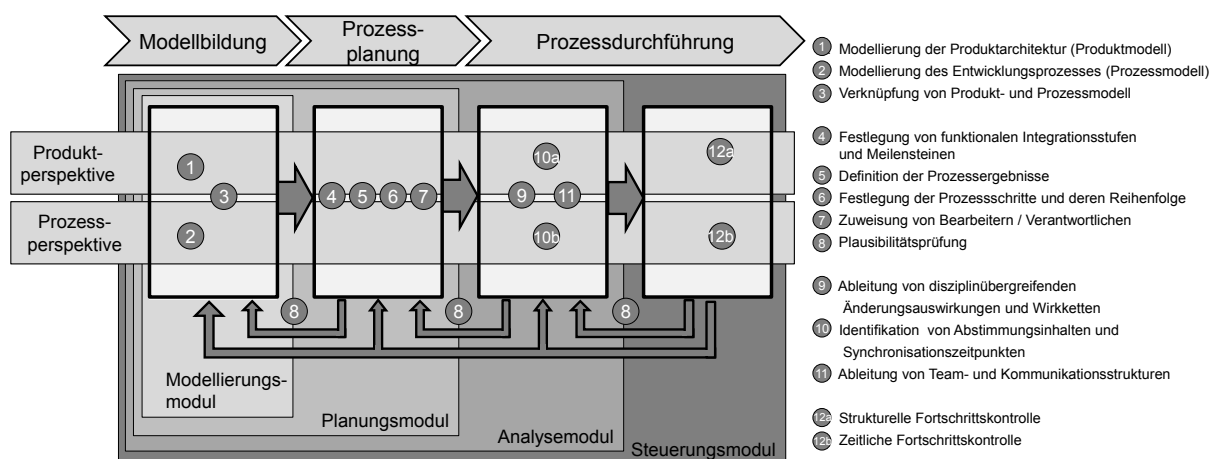


Bild 9-1: Vorgehensmodell und Zuordnung der Schritte zu Modulen

Zur Erhöhung der Verständlichkeit ist zusätzlich in Bild 9-2 das Metamodell des im Rahmen der Methodik verwendeten integrierten Produkt- und Prozessmodells angegeben.

	Funktion	Komponente	Prozessergebnis	Prozessschritt	Person	Meilenstein
Funktion	- hat Schnittstelle mit - hat Einfluss auf - trägt bei	- benötigt - wird realisiert durch	- wird realisiert durch - wird beeinflusst von	- wird realisiert durch - wird beeinflusst von	- wird verantwortet von - wird bearbeitet von	- wird überprüft von - ist erforderlich für - wird benötigt für
Komponente		- hat Schnittstelle mit - hat Einfluss auf	- wird beschrieben von - wird definiert von	- wird erzeugt von - wird beeinflusst von	- wird verantwortet von - wird bearbeitet von	- wird überprüft von - ist erforderlich für - ist betroffen von
Prozessergebnis			- erzeugt - benötigt	- wird erzeugt von - wird bearbeitet von - wird benötigt für	- wird verantwortet von - wird bearbeitet von	- wird benötigt für - ist betroffen von
Prozessschritt				- erfordert - liefert Input an	- wird durchgeführt - wird verantwortet	- wird beeinflusst von
Person					- kommuniziert mit - arbeitet zusammen mit	- ist betroffen von
Meilenstein						- ist Vorgänger - ist Nachfolger

Bild 9-2: Metamodell des integrierten Produkt- und Prozessmodells

# 1 Modellierung der Produktarchitektur (Produktmodell)

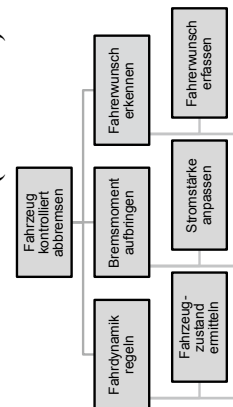
## Vorgehen und Hilfsmittel:

- Aufbau der Funktionshierarchie zur Identifikation von System- und Teilfunktionen sowie technischen Funktionen
- Verknüpfung und Konkretisierung der technischen Funktionen z. B. mit Hilfe eines *Umsatzorientierten Funktionsmodells* [LINDEMANN 2009, S. 119]
- Aufbau der Komponentenhierarchie
- Verknüpfung der Komponenten gemäß ihrer Wirkbeziehungen (Wirkstruktur); Erstellung z.B. mit Hilfe der *Spezifikationstechnik* [GAUSEMEIER et al. 2009a]
- Zuordnung von Komponenten zu den technischen Funktionen in der Funktionsstruktur
- Berechnung der Funktionsstrukturen mit Hilfe indirekter Abhängigkeiten  $DSM_{Funkt,phys}$  und  $DSM_{Funkt,Wirk}$

## Weitere Hinweise :

- **Berechnung der physikalischen Funktionsstruktur:** (Fall 1) [LINDEMANN et al. 2009, S.199]  
 $DSM_{Funkt,phys} = DMM_{Funkt-Komp} \bullet DMM^T_{Funkt-Komp}$
- **Berechnung der Wirkungs-Funktionsstruktur:** (Fall 4) [LINDEMANN et al. 2009, S.200]  
 $DSM_{Funkt,Wirk} = DMM_{Funkt-Komp} \bullet DSM_{Komp} \bullet DMM^T_{Funkt-Komp}$

## Beispiel Funktionshierarchie (Ausschnitt):



## Modellbildung:

- Design Structure Matrix der physikalischen Funktionsstruktur  $DSM_{Funkt,phys}$
- Design Structure Matrix der Wirkungs-Funktionsstruktur  $DSM_{Funkt,Wirk}$
- Design Structure Matrix der Komponenten (Wirkstruktur)  $DSM_{Komp}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten  $DMM_{Funkt-Komp}$
- Multiple-Domain Matrix der Produktmodells  $MDM_{Prod}$

Funktionen	Komponenten																				
Fahrwunsch erfassen																					
Pedalwirkei erkennen	1	1	1																		
Wirksignal leiten																					
Fahrzeugzustand ermitteln																					
Bremskraft berechnen																					
Bremskraftsignal leiten																					
Stromstärke anpassen																					
Bremskraft erzeugen																					
Bremskraft leiten																					
Bremsmoment erzeugen																					
Bremspedal																					
Pedalwirkei																					
Lager																					
Rahmen																					
Drehwirkei																					
CAN-Bus																					
Beschleunigungssensor																					
Radrehzahlsensor																					
Mikrocontroller																					
Fahrzeugmodell																					
CAN-Bus Treiber																					
Getriebe																					
Leistungselektronik																					
Linearschleifer																					
Bremsmechanik																					
Reibbeläge																					
Bremscheibe																					
Batterien																					

Funktionen	Komponenten																				
Fahrwunsch erfassen																					
Pedalwirkei erkennen	1	1	1																		
Wirksignal leiten																					
Fahrzeugzustand ermitteln																					
Bremskraft berechnen																					
Bremskraftsignal leiten																					
Stromstärke anpassen																					
Bremskraft erzeugen																					
Bremskraft leiten																					
Bremsmoment erzeugen																					
Bremspedal																					
Pedalwirkei																					
Lager																					
Rahmen																					
Drehwirkei																					
CAN-Bus																					
Beschleunigungssensor																					
Radrehzahlsensor																					
Mikrocontroller																					
Fahrzeugmodell																					
CAN-Bus Treiber																					
Getriebe																					
Leistungselektronik																					
Linearschleifer																					
Bremsmechanik																					
Reibbeläge																					
Bremscheibe																					
Batterien																					

DSM Funktionen (alternative Funktionsstrukturen, berechnet)

Wirkungs-Funktionsstruktur (DSM, gerichtet)

Physikalische Funktionsstruktur (DSM, ungerichtet)

## 2 Modellierung des Entwicklungsprozesses (Prozessmodell)

### Vorgehen und Hilfsmittel:

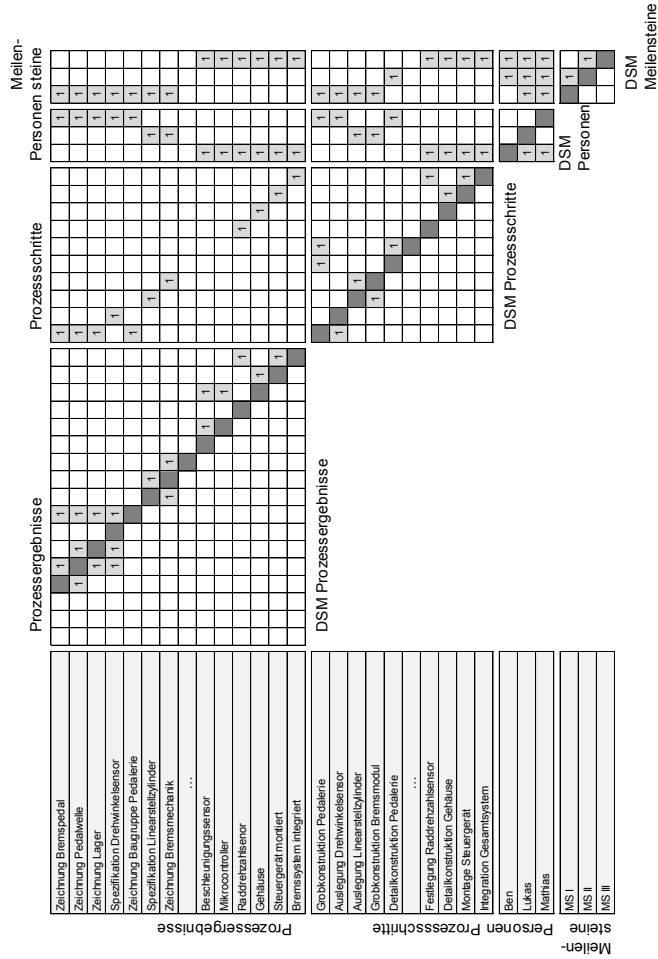
- Identifikation und Aufnahme der zur Entwicklung des Produktes erforderlichen Prozessergebnisse (z.B. Berechnungs- und Simulationsmodelle, Prototypen)
- Ermittlung der zur Erstellung der Prozessergebnisse notwendigen Prozessschritte, z.B. auf Basis von *Prozessbausteinen* [BICHLMAIER 2000].
- Verknüpfung von Prozessergebnissen und zugehörigen Prozessschritten
- Verknüpfung von Prozessschritten und Personen
- Verknüpfung von Meilensteinen und zu ihrer Erfüllung notwendigen Prozessergebnissen
- *Optional*: Verknüpfung der übrigen Domänen über entsprechende Teilmatrizen (*abhängig von Datenverfügbarkeit*)
- *Optional*: Berechnung fehlender Teilmatrizen

### Weitere Hinweise:

- Berechnung indirekter Abhängigkeiten:  
DSM: [LINDEMANN et al. 2009, S.198ff]  
DMM: [YASSINE et al. 2003]
- Modellierung des vollständigen Prozessmodells nur bei Analyse eines Prozesses möglich. Im Rahmen der Planung wird es erst in den weiteren Schritten befüllt.
- Die Dauer der Prozessschritte (zeitliche Komponenten) kann auf der Diagonalen der abgebildet werden.
- Prozessergebnisse umfassen sämtliche Artefakte, die innerhalb der Produktkonkretisierung
- In der Domäne Personen kann zwischen Bearbeiten und Verantwortlichen unterschieden werden. Ebenso können vollständige Organisationseinheiten abgebildet werden.

### Modellbildung:

- Design Structure Matrix der Prozessergebnisse  $DSM_{pErg}$
- Design Structure Matrix der Prozessschritte  $DSM_{pSchr}$
- Design Structure Matrix der Personen  $P_{pers}$
- Design Structure Matrix der Meilensteine  $DSM_{MS}$
- Domain Mapping Matrizen zur Verknüpfung der unterschiedlichen Domänen:  
 $DMM_{pErg-pSchr}$ ;  $DMM_{pErg-pers}$ ;  $DMM_{pErg-MS}$ ;  $DMM_{pSchr-pers}$ ;  $DMM_{pSchr-MS}$ ;  $DMM_{pers-MS}$ ;
- Multiple Domain Matrix der Prozessmodells  $MDM_{proZ}$





## 4 Festlegung von funktionalen Integrationsstufen und Meilensteinen

### Vorgehen und Hilfsmittel:

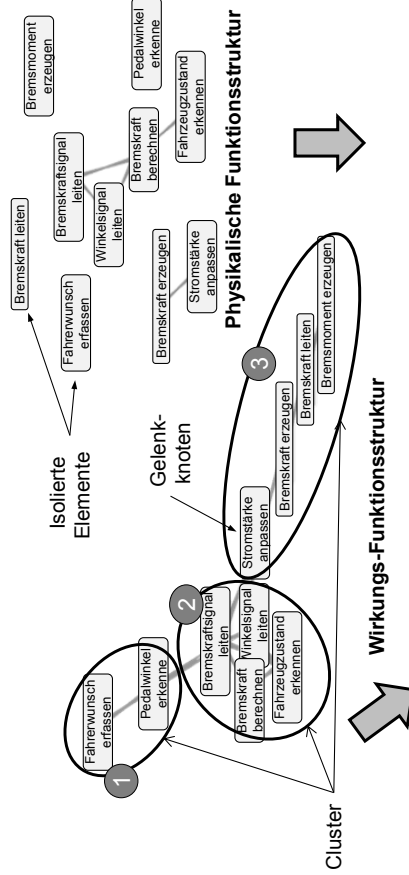
- Analyse und Klassifikation der Elemente der physikalischen Funktionsstruktur hinsichtlich der ermittelten *Strukturmerkmale* (Anhang Kap. 9.3)
- Analyse und Klassifikation der Elemente der Wirkungs-Funktionsstruktur hinsichtlich der ermittelten *Strukturmerkmale* (Anhang Kap. 9.3)
- Berechnung von *Kritikalität* und *Vernetzungsgrad der Elemente* in der Wirkungs-Funktionsstruktur Festlegung der Reihenfolge der Funktionsevolution- und Funktionsintegration auf Basis der ermittelten *Strukturmerkmale und -charakteristika*
- Zusammenfassen von Funktionen in Integrationsstufen und Zuordnen zu Meilensteinen

### Weitere Hinweise:

- Grundsätzliches Vorgehen: *Bottom-Up*; Funktionen mit niedrigerer Kritikalität bzw. niedrigem Vernetzungsgrad werden zuerst entwickelt und integriert.
- *Isolierte Elemente* und *Cluster* in der physikalischen Funktionsstruktur geben Hinweise aus separat zu entwickelnde Teilfunktionen.
- *Cluster* in der Wirkungs-Funktionsstruktur geben Hinweise aus separat zu entwickelnde Teilfunktionen
- Gelenkknoten können zur Integration von unterschiedlichen Funktionen verwendet werden
- Übereinstimmung von Cluster und Teil-/Systemfunktionen geben Hinweise auf die Reihenfolge der Funktionsintegration
- Berechnung der *Strukturcharakteristika*:  
*Vernetzungsgrad eines Elementes*:  
 Anzahl Relationen / 2 \* (Anzahl Elemente Struktur - 1)  
*Kritikalität eines Elementes*:  
 Aktivsumme / Passivsumme

### Modellbildung:

- Funktionshierarchie
- Graph der physikalischen Funktionsstruktur  $DSM_{Funkt,phys}$
- Graph der Wirkungs-Funktionsstruktur  $DSM_{Funkt,Wirk}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Funktionen und Meilensteinen  $DSM_{Funkt-MS}$



System-/ Teilfunktionen	Funktionen	Vernetzungsgrad	Kritikalität	Cluster
Fahrewunsch erkennen	Fahrewunsch erfassen	0,11	1	1
Fahrdynamik regeln	Pedalwinkel erkennen	0,22	3	1
	Wirkungssignal leiten	0,44	16	3
	Fahrgeschwindigkeit ermitteln	0,33	9	3
	Bremskraft berechnen	0,33	9	3
	Bremskraftsignal leiten	0,44	16	3
	Stromstärke anpassen	0,22	3	2
Bremsmoment aufbringen	Bremskraft erzeugen	0,22	4	2
	Bremskraft leiten	0,22	4	2
	Bremsmoment erzeugen	0,11	1	2

Meilensteine	MS I	MS II	MS III
Funktionen	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1

Strukturcharakteristika Wirkungs-Funktionsstruktur  
 Festlegung Meilensteine in Bezug auf Funktionen

## 5 Definition der Prozessergebnisse

### Vorgehen und Hilfsmittel:

- Festlegung der Ausprägung der Funktionen in den einzelnen Meilensteinen
- Festlegung von Komponenten und deren Ausprägungen (Prozessergebnisse) zur Realisierung der definierten Funktionen in den Meilensteinen
- Zuordnung von Prozessergebnissen zu Meilensteinen

### Beispiel:

- Die Prozessergebnisse *Anforderungsliste*, *Zeichnung Rahmen* und *Spezifikation Batterie* besitzen keine Verknüpfung stellen einen Input dar und sind nicht Bestandteil der Entwicklung. Daher besitzen sie keine Verknüpfung.

### Modellbildung:

- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Prozessergebnissen  $DMM_{k_{comp-PEig}}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Prozessergebnissen und Meilensteinen  $DMM_{PEig-MS}$

Prozessergebnisse	Meilensteine		
	MS I	MS II	MS III
Anforderungsliste			
Zeichnung Rahmen			
Spezifikation Batterie			
Zeichnung Bremspedal	1	1	
Zeichnung Pedalwelle	1	1	
Zeichnung Lager	1	1	
Spezifikation Drehwinkel sensor	1	1	
Zeichnung Baugruppe Pedalere	1	1	
Spezifikation Linearsteilzylinder	1	1	
Zeichnung Reibbeläge	1	1	
Zeichnung Bremsmechanik	1	1	
Zeichnung Baugruppe Bremse	1	1	1
Zeichnung Bremspedal final	1	1	1
Zeichnung Pedalwelle final	1	1	1
Zeichnung Lager final	1	1	1
Spezifikation Drehwinkel sensor final	1	1	1
Baugruppe Pedalere	1	1	1
Spezifikation Linearsteilzylinder final	1	1	1
Zeichnung Bremsmechanik final	1	1	1
Zeichnung Reibbeläge final	1	1	1
Zeichnung Bremsmechanik final	1	1	1
Zeichnung Bremspedal final	1	1	1
Zeichnung Baugruppe Bremse	1	1	1
Spezifikation Leistungselektronik final	1	1	1
Baugruppe Bremse	1	1	1
Fahrdynamikregelung Konzept	1	1	1
Fahrzeugmodell Konzept	1	1	1
Spezifikation Beschleunigungssensor	1	1	1
Spezifikation Mikrocontroller	1	1	1
Spezifikation Radrehzahl sensor	1	1	1
Pedalere montiert	1	1	1
Bremse montiert	1	1	1
CAN-Bus	1	1	1
Fahrdynamikregelung final	1	1	1
Fahrzeugmodell final	1	1	1
CAN-Bus Treiber	1	1	1
Beschleunigungssensor	1	1	1
Mikrocontroller	1	1	1
Radrehzahl sensor	1	1	1
Gehäuse	1	1	1
Steuergesät montiert	1	1	1
Bremsystem integriert	1	1	1

DMM Prozessergebnisse - Meilensteine

### • Hinweis:

Aus Platzgründen ist die transponierte  $DMM_{MS-PEig}$  dargestellt. Die enthaltenen Informationen sind identisch, da die abgebildeten Relationen keine Richtung aufweisen. Es wird lediglich eine Zuordnung von Prozessergebnissen und Meilensteine abgebildet.



## 6 Festlegung der Prozessschritte und deren Reihenfolge

### Vorgehen und Hilfsmittel:

- Festlegung von Prozessschritten zur Erstellung der definierten Prozessergebnisse
- Zuordnung von Prozessergebnissen zu Prozessschritten
- Ableitung der Initialen Reihenfolge der Prozessschritte aus Struktur der Ergebnispakete und Verknüpfung
- Optimierung der Reihenfolge der Prozessschritte durch *Triangularisierung* [LINDEMANN et al. 2009, S.231] und / oder *Clustering* [LINDEMANN et al. 2009, S.227]

### Weitere Hinweise:

- **Berechnung der initialen Reihenfolge der Prozessschritte:** (Fall 5) [LINDEMANN et al. 2009, S.199]

$$DSM_{pschr} = DMM_{PErg} \bullet DSM_{pschr} \bullet DMM_{PErg}$$

- Aufgrund der im Metamodell definierten Relation sind die Prozessergebnisse als Output mit den Prozessschritten verknüpft
- Mit dem verwendeten Prozessmodell ist lediglich strukturelle Planung des Prozesse möglich (Vermeidung, Verminderung von Iterationen)
- Als Ergänzung zur strukturellen Prozessplanung kann die Reihenfolge der Prozessschritte ausgehend von den Meilensteinen vorwärts und rückwärts geplant werden

### Modellbildung:

- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Prozessergebnissen  $DMM_{Komp-PErg}$
- Design Structure Matrix der Prozessschritte  $DMM_{pschr}$

		DSM Prozessschritte													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Prozessschritte	Auslegung Drehwinkelsensor														
	Grobkonstruktion Pedalerie														
	Auslegung Linearsteilzylinder														
	Grobkonstruktion Bremsmodul														
	Detailkonstruktion Pedalerie														
	Festlegung Drehwinkelsensor														
	Festlegung Linearsteilzylinder														
	Detailkonstruktion Bremsmodul														
	Festlegung Leistungselektronik														
	Vormontage Bremse														
Vormontage Pedalerie															
Auslegung Radbremszylinder															
Implementierung Fahrzeugmodell Konzept															
Auslegung Beschleunigungssensor															
Implementierung Fahrdynamikregelung Konzept															
Auslegung Mikrocontroller															
Montage Pedalerie															
Montage Bremse															
Implementierung Fahrzeugmodell final															
Implementierung Fahrdynamikregelung final															
Implementierung CAN-Bus Treiber															
Festlegung Beschleunigungssensor															
Festlegung Mikrocontroller															
Steuergerät flashen															
Detailkonstruktion Gehäuse															
Festlegung Radbremszylinder															
Montage CAN-Bus															
Montage Steuergerät															
Integration Gesamtsystem															
Prozessergebnisse	Zeichnung Lager														
	Spezifikation Drehwinkelsensor														
	Zeichnung Baugruppe Pedalerie														
	Spezifikation Linearsteilzylinder														
	Zeichnung Bremsmechanik														
	...														
	Fahrzeugmodell final														
	CAN-Bus Treiber														
	Beschleunigungssensor														
	Mikrocontroller														
Radbremszylinder															
Gehäuse															
Steuergerät montiert															
Bremsystem integriert															

DSM Prozessschritte

# 7 Zuweisen von Bearbeitern / Verantwortlichen

## Vorgehen und Hilfsmittel:

- Verknüpfung der Prozessschritte mit Personen (Bearbeitern)
- *Optional:* Verknüpfung der Funktionen mit Personen (abhängig von Organisation)
- *Optional:* Verknüpfung der Komponenten mit Personen (abhängig von Organisation)

## Weitere Hinweise:

- Es können unterschiedliche Rollen der Personen (z. B. Bearbeiter und Verantwortliche) parallel abgebildet werden.
- Unterschiedliche Rollen können in einer Person vereint sein.
- Ebenso können vollständige Organisationseinheiten (Abteilungen) oder Zulieferer / Entwicklungspartner abgebildet werden.

## Modellbildung:

- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Prozessschritten und Personen  $DM_{P\text{-Schritt-Pers}}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Funktionen und Personen  $DM_{F\text{-Funk-Pers}}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Personen  $DM_{K\text{-Komp-Pers}}$

Funktionen	Personen			DMM Funktionen - Personen
	Ben	Lukas	Mathias	
Fahrvorwunsch erfassen				1
Pedalkinkel erkennen				1
Winkelsignal leiten	1			
Fahrzeugzustand ermitteln				
Bremskraft berechnen	1			
Bremskratrsignal leiten	1			
Stromstärke anpassen				1
Bremskraft erzeugen				1
Bremskraft leiten	1			
Bremsmoment erzeugen				1

Komponenten	Personen			DMM Komponenten - Personen
	Ben	Lukas	Mathias	
Bremspedal				1
Pedalkwelle				1
Lager				1
Rahmen				
Drehwinkelsensor				1
CAN-Bus	1			
Beschleunigungssensor	1			
Raddrehzahlsensor	1			
Mikrocontroller	1			
Fahrdynamikregelung				
Fahrzeugetmodell	1			
CAN-Bus Treiber	1			
Gehäuse	1			
Leistungselektronik				1
Linearstellzylinder				1
Bremsmechanik				1
Reibbeläge				1
Bremsscheibe				1
Batterien				

Personen	DMM Prozessschritte - Personen			
	Ben	Lukas	Mathias	
Grobkonstruktion Pedalerie				1
Auslegung Drehwinkelsensor				1
Auslegung Linearstellzylinder		1		
Grobkonstruktion Bremsmodul				1
Detailkonstruktion Pedalerie				1
Festlegung Drehwinkelsensor				1
Vormontage Pedalerie				1
Festlegung Linearstellzylinder				1
Detailkonstruktion Bremsmodul				1
Festlegung Leistungselektronik				1
Vormontage Bremsse				1
Implementierung Fahrdynamikregelung Konzept	1			
Implementierung Fahrzeugmodell Konzept				1
Auslegung Beschleunigungssensor				1
Auslegung Mikrocontroller				1
Auslegung Raddrehzahlsensor				1
Montage Pedalerie				1
Montage Bremsse				1
Montage CAN-Bus				1
Implementierung Fahrdynamikregelung final	1			
Implementierung Fahrzeugmodell final				1
Implementierung CAN-Bus Treiber				1
Steuergerät flashen				1
Festlegung Beschleunigungssensor				1
Festlegung Mikrocontroller				1
Festlegung Raddrehzahlsensor				1
Detailkonstruktion Gehäuse				1
Montage Steuergerät				1
Integration Gesamtsystem				1

# 8 Plausibilitätsprüfung

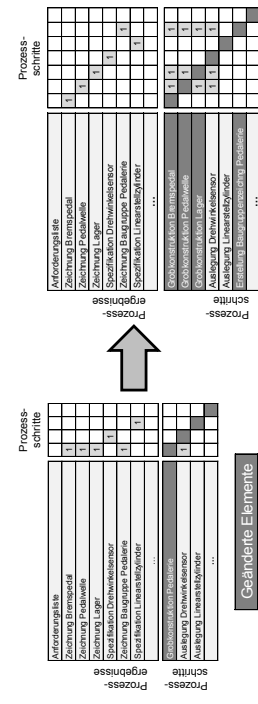
## Vorgehen und Hilfsmittel:

- Überprüfung der Reihenfolge der Prozessschritte in Bezug unberücksichtigte direkte und indirekte
  - Abhängigkeiten in der Produktarchitektur
  - Abhängigkeiten zwischen Prozessergebnissen
  - Verknüpfung der Meilensteine
- Ermittlung der zeitlichen Dauer der Prozessschritte und Durchführung einer Terminplanung (separates Modell, z.B. *Gantt-Chart*)
- Überprüfung des Terminplans hinsichtlich relevanter Randbedingungen (z.B. Ressourcenverfügbarkeit)
- Anpassung der Reihenfolge der Prozessschritte
- *Optional*: Detaillierung des Modells (falls erforderlich, abhängig von Aufgabenstellung)

## Weitere Hinweise:

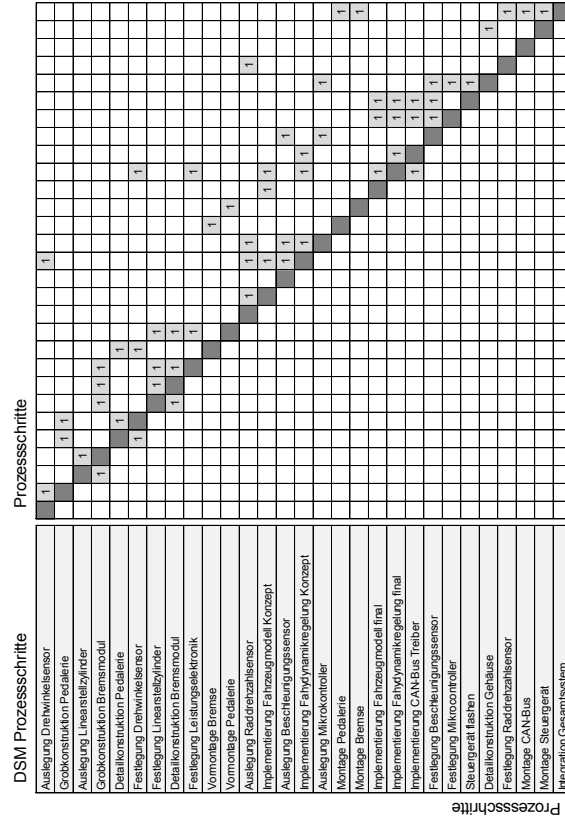
- Zur Unterstützung der Plausibilitätsprüfung können sämtliche Schritte des Analysemoduls (Schritt 9 bis 11) herangezogen werden.

## Beispiel Detaillierung des Modells (Prozessschritte):



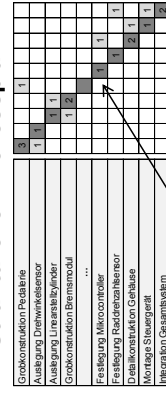
## Modellbildung:

- Multiple Domain Matrix des integrierten Produkt- und Prozessmodells MDM<sub>PPS</sub>
- Design Structure Matrix der Prozessschritte DSM<sub>PSchr</sub>

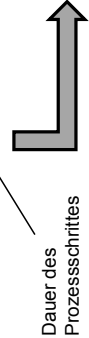
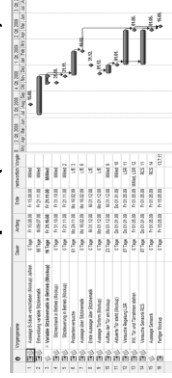


- Modellierung der Zeitdauer von Prozessschritten DSM<sub>PSchT</sub> und Terminplanung

## Struktureller Prozessplan



## Terminplan (Gantt-Chart)



Dauer des Prozessschrittes

# 9 Ableitung disziplinübergreifender Änderungsauswirkungen und Wirkketten

## Vorgehen und Hilfsmittel:

- Untersuchung des integrierten Produkt- und Prozessmodells hinsichtlich disziplin- und domänenübergreifenden Änderungsauswirkungen und Wirkketten
- (Graphische) Visualisierung und Kommunikation der identifizierten Abhängigkeiten zur Unterstützung der
  - Synchronisation der Disziplinen
  - Unterstützung von Entscheidungen
  - Erhöhung des Systemverständnisses
- Alternative Möglichkeiten zur strukturellen Analyse des Systemmodells [MAURER 2007, S.136ff]:
  - *Auswirkungsanalyse*
  - *Rückverfolgungsanalyse*
  - *Einfluss-Checkliste*
- Konkret durchzuführende Analyse sind abhängig von der betrachteten Aufgaben- bzw. Fragestellung

## Weitere Hinweise:

- Die Partitionierung der Elemente wird über die Farbgebung modelliert und abgebildet.
- Berechnung indirekter Abhängigkeiten:  
DSM: [LINDEMANN et al. 2009, S.198ff]  
DMM: [YASSINE et al. 2003]
- Dreidimensionale Visualisierung des integrierten Produkt- und Prozessmodells: [DIEHL 2009]

## Beispiel Auswirkungsanalyse:

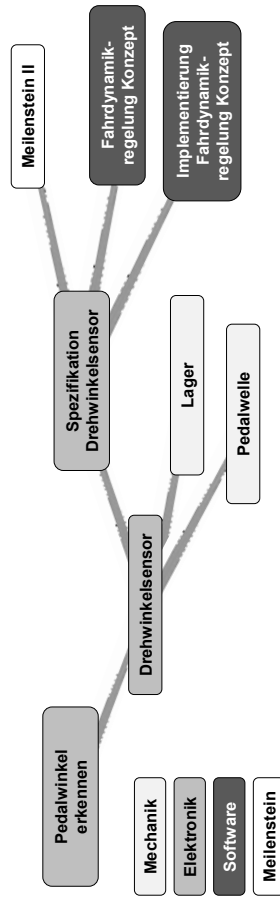
- Änderung am Drehwinkelsensor (Elektronik) erfordert eine Anpassung des Fahrdynamikregelung (Software)

## Beispiel Einfluss-Checkliste:

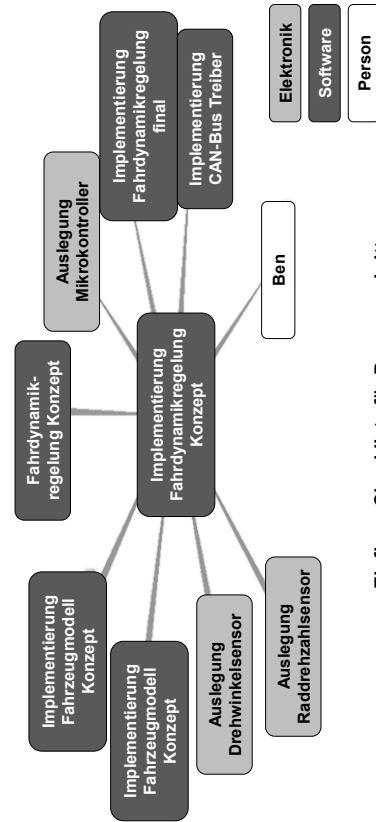
- Konzept der Fahrdynamikregelung (Software) wird unter anderem von verwendeten Drehwinkelsensor, Raddrehzahlsensor sowie Fahrzeugmodell beeinflusst.

## Modellbildung:

- Multiple Domain Matrix des integrierten Produkt- und Prozessmodells MDM<sub>PPS</sub>
- Graph der Multiple Domain Matrix des integrierten Produkt- und Prozessmodells MDM<sub>PPS</sub>



Auswirkungsanalyse am Beispiel Drehwinkelsensor (Auszug)



Einfluss-Checkliste für Prozessschritt „Implementierung Fahrdynamikregelung Konzept“

# 10 Identifikation von Abstimmungsinhalten und Synchronisationszeitpunkten

## Vorgehen und Hilfsmittel:

- Ermittlung von Abhängigkeiten zwischen Funktionen und Personen sowie Funktionen und Meilensteinen (Funktionsperspektive)
- Ermittlung von Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Personen sowie Komponenten und Meilensteinen (Komponentenperspektive)
- Verknüpfung mit Personen zeigt an, welche Personen in Abstimmung einbezogen werden müssen
- Verknüpfung mit Meilensteinen zeigt an, welche Funktionen/Komponenten von der jeweiligen Prozessphase betroffen sind (Abstimmungsinhalte)
- Synchronisationszeitpunkte ergeben sich aus Änderungen mit disziplinübergreifenden Auswirkungen.
- Falls keine nativen Daten vorhanden, können die entsprechenden Matrizen über Möglichkeiten zur Ableitung indirekter Abhängigkeiten berechnet werden

## Modellbildung:

- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Funktionen und Personen  $DMM_{Funkt,Pers}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Funktionen und Meilensteinen  $DMM_{Funkt,MS}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Personen  $DMM_{Komp,Pers}$
- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Meilensteinen  $DMM_{Komp,MS}$

## Komponentenperspektive

Komponenten	Personen					Meilensteine			
	Ben	Lukas	Mathias	MS I	MS II	MS III	MS I	MS II	MS III
Bremspedal				1	1	1			
Pedalwelle				1	1	1			
Lager				1	1	1			
Rahmen									
Drehwinkelsensor				1	1	1			
CAN-Bus				1					
Beschleunigungssensor				1					
Raddrehzahlsensor				1					
Mikrocontroller				1					
Fahrdynamikregelung				1					
Fahrzeugmodell				1					
CAN-Bus Treiber				1					
Gehäuse				1					
Leistungselektronik				1					
Linealsteilzylinder				1					
Bremsmechanik				1					
Reibbeläge				1					
Bremsscheibe				1					
Batterien				1					

## Funktionsperspektive

Funktionen	Personen					Meilensteine			
	Ben	Lukas	Mathias	MS I	MS II	MS III	MS I	MS II	MS III
Fahrerwunsch erfassen				1	1	1			
Pedalwinkel erkennen				1	1	1			
Winkelsignal leiten				1	1	1			
Fahrzeugzustand ermitteln				1	1	1			
Bremskraft berechnen				1	1	1			
Bremskraftsignal leiten				1	1	1			
Stromstärke anpassen				1	1	1			
Bremskraft erzeugen				1	1	1			
Bremskraft leiten				1	1	1			
Bremsmoment erzeugen				1	1	1			

# 11 Ableitung von Team- und Kommunikationsstrukturen

## Vorgehen und Hilfsmittel:

- Ableitung von *indirekten Abhängigkeiten* zwischen Personen als Indikator für Team- und Kommunikationsstrukturen
- Ermittlung der Verknüpfung von Personen aufgrund von Abhängigkeiten der
  - Funktionen
  - Komponenten
  - Prozessschritte
- Team und Kommunikationsstrukturen können in Bezug auf Prozessphasen oder Gesamtprozess ermittelt werden.

## Weitere Hinweise:

- **Berechnung der Personenstruktur auf Grundlage der Funktionsstruktur:**

(Fall 4) [LINDEMANN ET AL. 2009, S.200]

$$DSM_{Pers,Funk} = DMM_{Funkt-Funk}^T \bullet DSM_{Funkt} \bullet DMM_{Funkt-Pers}$$

- **Berechnung der Personenstruktur auf Grundlage der Komponentenstruktur:**

(Fall 4) [LINDEMANN ET AL. 2009, S.200]

$$DSM_{Pers,Komp} = DMM_{Komp-Pers}^T \bullet DSM_{Komp} \bullet DMM_{Komp-Pers}$$

- **Berechnung der Personenstruktur auf Grundlage der Funktionsstruktur:**

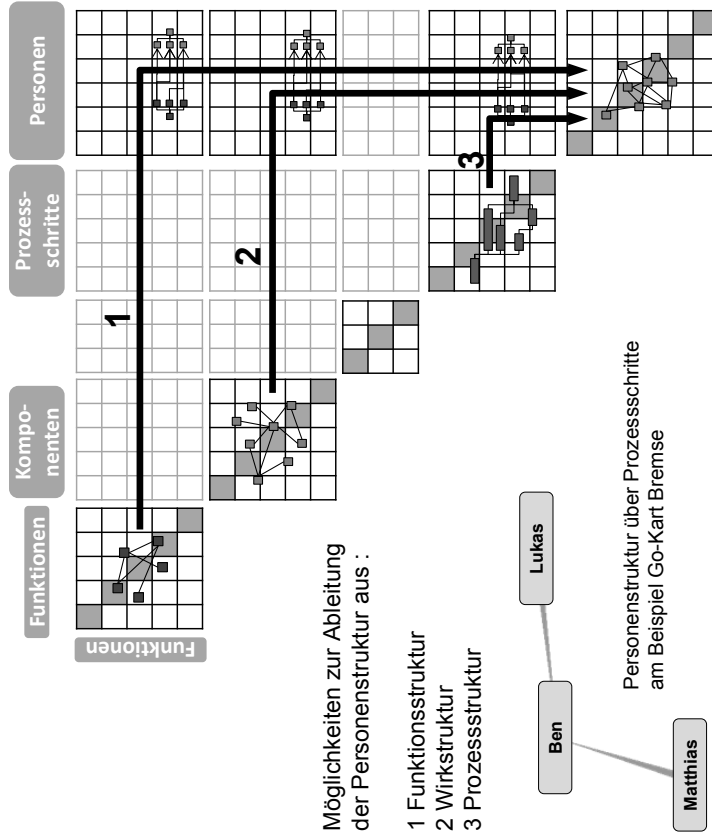
(Fall 4) [LINDEMANN ET AL. 2009, S.200]

$$DSM_{Pers,Pschr} = DMM_{Pschr-Pers}^T \bullet DSM_{Pschr} \bullet DMM_{Pschr-Pers}$$

- In der Domäne Personen können vollständige Organisationseinheiten (Abteilungen) oder Zulieferer / Entwicklungspartner abgebildet werden.

## Modellbildung:

- Design Structure Matrix der Verknüpfung von Personen aufgrund der Verknüpfung der Funktionen  $DSM_{Pers,Funk}$
- Design Structure Matrix der Verknüpfung von Personen aufgrund der Verknüpfung der Komponenten  $DSM_{Pers,Komp}$
- Design Structure Matrix Verknüpfung von Personen der Verknüpfung der Prozessschritte  $DSM_{Pers,Pschr}$



## 12 Strukturelle und zeitliche Fortschrittsskontrolle

### Vorgehen und Hilfsmittel:

- Ermittlung des aktuellen Entwicklungsstandes in Bezug auf
  - realisierte Funktionen
  - erstellte Prozessergebnisse
  - abgeschlossene Prozessschritte
- Vergleich von aktuellem Ist-Stand mit geplanten Soll-Stand zur Ableitung von strukturellen Produktreifegraden
- Ermittlung des zeitlichen Entwicklungsfortschritts aus Analyse des Erfüllungsgrades der Prozessschritte
- Ermittlung des erforderlichen zeitlichen Aufwands zur Behebung von identifizierten Zielabweichungen (unter Einbeziehung von Expertenwissen)
- Ggf. Anpassung des Entwicklungsprozesses

### Weitere Hinweise:

- **Berechnung des Produktreifegrades in Bezug auf Funktionen  $RG_{Funkt}$ :**

$$RG_{Funkt} = \frac{\text{Anzahl realisierter Funktionen}}{\text{Anzahl zu realisierender Funktionen}}$$

- **Berechnung des Produktreifegrades in Bezug auf Prozessergebnisse  $RG_{Komp}$ :**

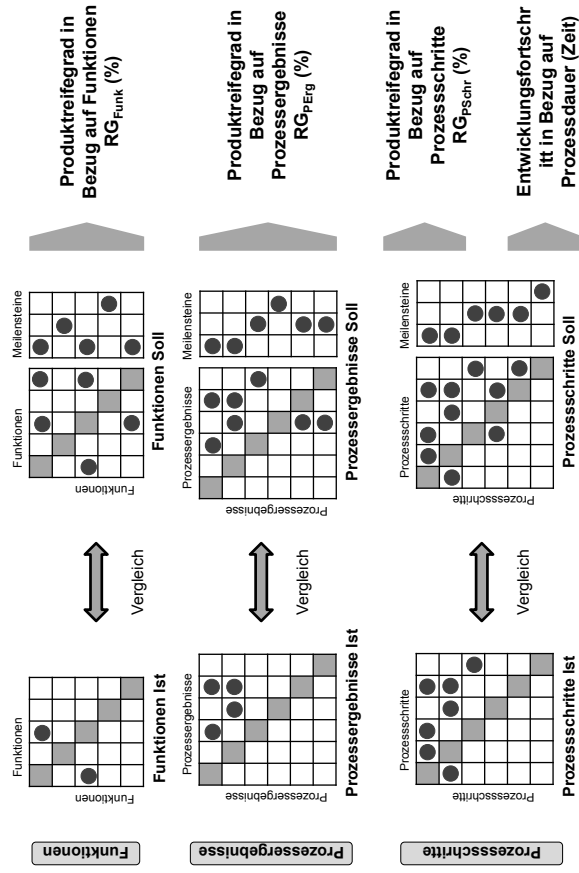
$$RG_{P\text{Erg}} = \frac{\text{Anzahl erstellter Prozessergebnisse}}{\text{Anzahl zu erstellender Prozessergebnisse}}$$

- **Berechnung des Produktreifegrades in Bezug auf Prozessschritte  $RG_{Schr}$ :**

$$RG_{P\text{Schr}} = \frac{\text{Anzahl abgeschlossener Prozessschritte}}{\text{Anzahl durchzuführender Prozessschritte}}$$

### Modellbildung:

- Aktuelle und geplante Ausprägung der Design Structure Matrix der physikalischen Funktionsstruktur  $DSM_{Funkt,phys}$
- Aktuelle und geplante Ausprägung der Design Structure Matrix der Funktionsstruktur  $DSM_{Funkt,Wirk}$
- Aktuelle und geplante Ausprägung der Design Structure Matrix der Prozessergebnisse  $DSM_{PErg}$
- Aktuelle und geplante Ausprägung der Design Structure Matrix der Prozessschritte  $DSM_{PSchr}$







## 10. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München,  
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:  
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode. München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:  
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.  
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:  
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.  
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:  
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.  
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:  
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.  
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:  
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.  
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:  
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.  
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:  
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.  
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:  
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.  
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:  
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.  
München: TU, Diss. 1978.

- D11 HEISIG, R.:  
Längencodierer mit Hilfsbewegung.  
München: TU, Diss. 1979.
- D12 KIEWERT, A.:  
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.  
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:  
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60).  
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:  
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.  
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:  
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.  
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:  
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.  
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:  
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.  
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:  
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.  
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:  
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.  
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:  
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.  
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985. Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:  
Konstruieren als gedanklicher Prozess.  
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMANN, H. J.:  
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.  
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:  
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gussgehäusen.  
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:  
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.  
München: TU, Diss. 1987.
- D25 FIGEL, K.:  
Optimieren beim Konstruieren.  
München: Hanser 1988. Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.

## Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:  
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.  
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1). Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:  
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.  
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2). Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSCHNEIDER, H.-J.:  
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.  
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3). Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:  
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluss an ein CAD-System.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:  
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.  
Datenbankgestützte Teilverwaltung und Wiederholteilsuche.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D32 NEESE, J.:  
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:  
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.  
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:  
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.  
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:  
Systematischer Entwicklungsprozess am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:  
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:  
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D38 LENK, E.:  
Zur Problematik der technischen Bewertung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:  
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14). Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D40 SCHIEBELER, R.:  
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:  
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:  
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:  
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:  
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:  
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:  
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:  
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.  
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:  
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.  
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:  
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.  
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:  
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.  
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25). Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.:  
MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:  
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.  
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPOULIS, A.:  
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D53 STEINMEIER, E.:  
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:  
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29). Zugl. München: TU, Diss. 1998.

- D55 GÜNTHER, J.:  
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIERSACK, H.:  
Methode für Kraffeinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.  
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:  
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:  
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖSSER, R.:  
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:  
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:  
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:  
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36). Zugl. München: TU, Diss. 1999.

### Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:  
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D64 ASSMANN, G.:  
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.  
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:  
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.  
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.:  
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.  
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D67 STETTER, R.:  
Method Implementation in Integrated Product Development.  
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:  
Modell der Methoden- und Hilfsmittelführung im Bereich der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42). Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D69 COLLIN, H.:  
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:  
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:  
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:  
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:  
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.  
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:  
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:  
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:  
Elementarmethoden zur Lösungssuche.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:  
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:  
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:  
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.  
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:  
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.  
München: TU, Diss. 2003.
- D81 GRAMANN, J.:  
Problemmodelle und Bionik als Methode.  
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D82 PULM, U.:  
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D83 HUTTERER, P.:  
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:  
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 58). Zugl. München: TU, Diss. 2005.

- D85 PACHE, M.:  
Sketching for Conceptual Design.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:  
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:  
Anforderungsklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 61). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:  
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 62). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D89 STRICKER, H.:  
Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 63). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D90 NIBL, A.:  
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 64). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D91 MÜLLER, F.:  
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.  
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 65). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D92 ERDELL, E.:  
Methodenanwendung in der Hochbauplanung – Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 66). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D93 GAHR, A.:  
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D94 RENNER, I.:  
Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D95 PONN, J.:  
Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D96 HERFELD, U.:  
Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation.  
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 70). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D97 SCHNEIDER, S.:  
Model for the evaluation of engineering design methods.  
München: Dr. Hut 2008 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D98 FELGEN, L.:  
Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D99 GRIEB, J.:  
Auswahl von Werkzeugen und Methoden für verteilte Produktentwicklungsprozesse.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007

- D100 MAURER, M.:  
Structural Awareness in Complex Product Design.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D101 BAUMBERGER, C.:  
Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D102 KEIJZER, W.:  
Wandlungsfähigkeit von Entwicklungsnetzwerken – ein Modell am Beispiel der Automobilindustrie.  
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D103 LORENZ, M.:  
Handling of Strategic Uncertainties in Integrated Product Development.  
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2008.
- D104 KREIMEYER, M.:  
Structural Measurement System for Engineering Design Processes.  
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D105 DIEHL, H.:  
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme.  
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D106 DICK, B.:  
Untersuchung und Modell zur Beschreibung des Einsatzes bildlicher Produktmodelle durch Entwicklerteams in der Lösungssuche.  
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D107 GAAG, A.:  
Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D108 ZIRKLER, S.:  
Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte.  
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D109 LAUER, W.:  
Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen.  
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D110 MEIWALD, T.:  
Konzepte zum Schutz vor Produktpiraterie und unerwünschtem Know-how-Abfluss.  
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D111 ROELOFSEN, J.:  
Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen.  
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D112 PETERMANN, M.:  
Schutz von Technologiewissen in der Investitionsgüterindustrie.  
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D113 GORBEA, C.:  
Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis in a New Age of Architectural Competition.  
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D114 FILOUS, M.:  
Lizenzierungsgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden zur Integration lizenzierungsrelevanter Aktivitäten in Produktentstehungsprozessen des Maschinen- und Anlagenbaus.  
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.



- D115 ANTON, T.:  
Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation.  
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011
- D116 KESPER, H.:  
Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden.  
München: Dr. Hut 2012 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2012.
- D117 KIRSCHNER, R.:  
Methodische Offene Produktentwicklung.  
München: TU, Diss. 2012.
- D118 HEPPELLE, C.:  
Planung lebenszyklusgerechter Leistungsbündel.  
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.