

Lehrstuhl für Produktentwicklung
der Technischen Universität München

**Systemorientierte Visualisierung
disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten
mechatronischer Automobilsysteme**

Holger Diehl

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. Klaus Bender
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 23.09.2008 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 18.03.2009 angenommen.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Problemstellung:

Insbesondere härtere gesetzliche Anforderungen in Bezug auf Sicherheit und Emissionen in Verbindung mit steigenden Preis-/ Leistungsverhältnissen elektronischer Bauteile haben in den letzten Jahren zu einem extremen Anstieg an mechatronischen Systemen im Automobil geführt. Die Vielzahl an mechatronisch realisierten Funktionen bedingt eine starke Vernetzung der einzelnen Teilsysteme und verursacht eine hohe Produktkomplexität. Durch den steigenden Anteil an mechatronischen Systemen erhöht sich die Interdisziplinarität des Entwicklungsprozesses. Dies führt wiederum zu einer stark erhöhten Prozesskomplexität. Um unter diesen Voraussetzungen in immer kürzeren Entwicklungszeiten und unter verschärften Wettbewerbsbedingungen erfolgreich robuste Automobilsysteme auf den Markt bringen zu können, ist eine effiziente Integration der einzelnen Disziplinen der Mechatronik notwendig. In der Praxis fehlt jedoch häufig das notwendige disziplinübergreifende System- und Problemverständnis. Prozesse sind zu wenig integrativ gestaltet und Verantwortungsstrukturen häufig intransparent. Eine Unterstützung durch Softwaresysteme ist bis dato nicht erkennbar. Vielmehr verstärken die bestehenden Systeme die disziplinspezifische Spaltung der Entwicklung. Diese Schwachstellen der Entwicklung mechatronischer Automobilsysteme schlagen sich häufig in Problemen bei der fristgerechten und reibungslosen Durchführung von Absicherungsaktivitäten sowie schlechten Ergebnissen dieser Reifeprüfungen nieder und führen somit zu erheblichen Mehraufwendungen insbesondere in späten Entwicklungsphasen.

Zielsetzung:

Ziel der Arbeit ist es, die Herausforderungen der interdisziplinären Serienentwicklung mechatronischer Automobilsysteme aufzuzeigen und durch eine geeignete Methodik die Analyse und integrierte Darstellung dieser komplexen Abhängigkeiten zu verbessern. Hierdurch soll ein Beitrag zur Integration von Mechanikern, Elektrotechnikern und Informatikern im mechatronischen Entwicklungsprozess geliefert werden.

Ergebnisse:

Zentrales Ergebnis der Arbeit ist eine Methodik zur transparenten Abbildung interdisziplinärer Entwicklungsabhängigkeiten im mechatronischen Kontext. Erweitert wird diese durch ein Visualisierungstool welches eine integrierte dreidimensionale Darstellung der methodisch erarbeiteten Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Betrachtungsdomänen Funktionen, Systemelemente und Personen ermöglicht. Die visualisierten Abhängigkeiten können interaktiv aus verschiedenen Perspektiven betrachtet und nachvollzogen werden. Zentrale Fragestellungen, die durch die entwickelte Methodik und das zugehörige Visualisierungstool beantwortet werden können, sind insbesondere: Funktionsverantwortlichkeiten, Systemelementverantwortlichkeiten sowie notwendige interdisziplinäre Kommunikationsstrukturen auf Grund von Schnittstellen zwischen Systemelementen beziehungsweise Funktionen. Darüber hinaus wird in der Arbeit ein Integrationsmodell zu

besseren Vernetzung von interdisziplinären Absicherungsaktivitäten vorgestellt. Mit Hilfe des Modells lassen sich interdisziplinäre Kommunikationsteams ableiten, die vor und nach Absicherungsaktivitäten gebildet werden sollten.

Die Ergebnisse der Arbeit werden am Beispiel der Entwicklung eines automatisierten Türöffnungskonzeptes für Automobile erarbeitet und beschrieben.

Folgerungen für die industrielle Praxis:

Die entwickelte Methodik zur Analyse und Abbildung zentraler interdisziplinärer Abhängigkeiten bietet dem einzelnen Entwickler in der industriellen Praxis eine Unterstützung auf der Mikroebene des operativen Alltags. Methodik und zugehörige Visualisierung ermöglichen die integrierte Darstellung bisher zu stark verteilter Abhängigkeitsinformationen. So geht dem einzelnen Mitarbeiter durch die große Anzahl spezifischer Datenverwaltungssysteme meist der Überblick über die zentralen Entwicklungsabhängigkeiten verloren. Mit Hilfe der erarbeiteten Visualisierung ist es möglich schnell und intuitiv die wichtigsten Abhängigkeiten des mechatronischen Systems nachzuvollziehen und notwendige Ansprechpartner für interdisziplinäre Abstimmungen zu ermitteln. Somit wird der einzelne Entwickler bei der Beherrschung der gestiegenen Komplexität mechatronischer Fahrzeugsysteme besser unterstützt. Durch die Möglichkeit die Methodik mit bestehenden Datenmanagementsystemen zu verknüpfen, kann dieses Potential weiter ausgebaut werden.

Darüber hinaus trägt der entwickelte Ansatz der verstärkten Funktionsorientierung im mechatronischen Produktentwicklungsprozess Rechnung. Neben dem einfachen Nachvollzug funktionaler Verantwortlichkeiten sowie funktionaler Vernetzungen der Systemelemente können mit Hilfe des entwickelten Integrationsmodells funktionsorientierte Kommunikations- und Absicherungsteams definiert werden.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft:

Die erarbeitete Visualisierungsmethodik stellt eine Erweiterung klassischer Abbildungen stärkebasierter Graphen dar und erlaubt die Analyse der strukturellen Deckung verschiedener Betrachtungsbereiche auf Makro- und Mikroebene. Dieser Aspekt sollte durch weitere Forschungsaktivitäten intensiver untersucht werden. Hierdurch können insbesondere Angleichungsbedarfe zwischen Produkt-, Aufbau- und Ablaufstrukturen identifiziert und somit erhebliche Verbesserungspotentiale abgeleitet werden. Die durch das funktionsorientierte Integrationsmodell gelieferten Ansätze sollten in weiteren Forschungsaktivitäten mit der merkmalsorientierten Sicht gekoppelt werden, um eine weitere Verbesserung der integrativen Entwicklung zu ermöglichen.

Garching im Oktober 2009

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 in den Jahren 2003-2008. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Professor Lindemann, für die Betreuung dieser Arbeit. Er gewährte mir die notwendige Freiheit um neue Ideen und Ansätze zu entwickeln, gab mir jedoch auch jederzeit den wissenschaftlichen Rückhalt sowie die entscheidenden Impulse um diese Arbeit auf ein gutes Fundament zu stellen.

Professor Reinhart danke ich für die kritische Auseinandersetzung mit meiner Dissertation, die konstruktiven Anmerkungen, sowie für die Mitberichterstattung. Herrn Professor Bender möchte ich herzlich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Von der BMW AG gilt mein besonderer Dank den Herren Dr. Patrick Kuhl, Marco Bross, Walter Hübner, Peter Krumbach sowie Martin Wegge für die kritische Diskussion meiner Ansätze aus industrieller Sicht.

Allen Kollegen am Lehrstuhl für Produktentwicklung möchte ich herzlich für die wunderschönen Jahre danken. Hervorheben möchte ich dabei Matthias Kreimeyer und Frank Deubzer für die kritische und konstruktive Unterstützung bei der Vorbereitung meines Dr. Vortrages sowie für die Freundschaft, die uns seit mehreren Jahren verbindet. Maik Maurer gebührt mein besonderer Dank, da ohne seine MDM-Methodik und seine wissenschaftliche Weitsicht diese Arbeit nicht existieren würde. Für die intensive Unterstützung bei der softwaretechnischen Umsetzung meiner Ideen stehe ich in tiefer Schuld bei meinem Studenten Frans Fürst. Darüber hinaus möchte ich mich bei Luc Felgen, Rainer Hinterberger, Joseph Ponn sowie Hans Stricker für Ihre Unterstützung und Freundschaft bedanken.

Bei meinem Vater Dr. Elmar Diehl bedanke ich mich herzlich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

November 2009

Holger Diehl

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Erfahrungsgrundlage der Arbeit	5
1.3	Zielsetzung der Arbeit	8
1.4	Aufbau der Arbeit	10
2	Grundlagen der Mechatronik	13
2.1	Definition Mechatronik	13
2.2	Entwicklungstrends	16
3	Entwicklungsmethodische Grundlagen	17
3.1	Strukturierung entwicklungsmethodischer Ansätze	17
3.2	Grundlagen der Systemtechnik	18
3.2.1	Begriffsklärung System	18
3.2.2	Begriffsklärung Struktur	20
3.2.3	Klassische strukturbezogene Produktmodelle	21
3.2.4	Matrizen zur Modellierung von Systemen und deren Strukturen	23
3.2.5	Graphen zur Modellierung von Systemen und deren Strukturen	27
3.2.6	Komplexität von Systemen	30
3.2.7	Strukturierung des sozio-technischen Systems der Produktentwicklung	31
3.3	Vorgehensmodelle	32
3.3.1	Allgemeine Vorgehensmodelle der Produktentwicklung	32
3.3.2	Vorgehensmodelle der Softwareentwicklung	36
3.3.3	Vorgehensmodelle der Elektrik-/Elektronikentwicklung	40
3.3.4	Vorgehensmodelle für die Mechatronik	42
3.3.5	Fazit	47
3.4	Strategien	48
3.4.1	Integrierte Produktentwicklung	48
3.4.2	Simultaneous Engineering	49

3.4.3	Projektmanagement	51
3.4.4	Fazit	54
4	Grundlagen mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme	55
4.1	Innovationsmotor Mechatronik	55
4.2	Struktur mechatronischer Systeme im Automobilbau	56
4.3	Phasen der Fahrzeugentwicklung	58
4.3.1	Projektunabhängige Vorphase	59
4.3.2	Projektbezogene frühe Entwicklungsphase	59
4.3.3	Serienentwicklung	60
5	Analyse der Herausforderungen der interdisziplinären Serienentwicklung	65
5.1	Vorgehensweise der Analyse	65
5.1.1	Vernetzte Betrachtung von Produkt, Prozess und Aufbauorganisation	65
5.1.2	Anforderungen an Dienstleister und Ansprechpartner	66
5.1.3	Vorgehensmodell zur strukturbasierten Prozessanalyse	68
5.2	Identifizierte Herausforderungen	70
5.2.1	Herausforderungen durch Wandlung der Produktstruktur des Automobils	70
5.2.2	Praxisbeispiele	71
5.2.3	Herausforderungen durch erhöhte Interdisziplinarität	74
5.2.4	Strukturbedingter Bedarf einer stärkeren Funktionsorientierung	75
5.2.5	Herausforderungen durch intransparente Prozessdarstellungen	76
5.2.6	Herausforderungen durch intransparente Verantwortungsstrukturen	79
5.2.7	Mangelnde Komplexitätsreduktion durch Werkzeuge und Vorgehensweisen	81
5.3	Zusammenfassung und Fazit	82
6	Übersicht der Lösungsansätze	87
6.1	Abbildung und Visualisierung eines integrierten Produktmodells	87
6.2	Weiterführende Konzepte zur funktionsorientierten Integration	88
6.3	Quellen für benötigte Abhängigkeitsinformationen	90
7	Integriertes Produktmodell	93
7.1	Begriffsklärung	93
7.2	Überblick der methodischen Abhängigkeitsaufnahme	96

7.3	Funktionale Dekomposition am Beispiel komfortables Einsteigen	98
7.4	Vernetzung von Funktionshierarchie und Baustruktur	103
7.5	Vernetzung innerhalb der Bereiche Funktionen und Systemelemente	104
7.6	Vereinheitlichung der erarbeiteten Abhängigkeitsinformationen	107
8	Multidimensionale Abhängigkeitsvisualisierung 3D-MECHGRAPH	111
8.1	Grenzen stärkebasierter Graphen	111
8.2	Alternative Visualisierungsansätze in der Literatur	112
8.3	Aufbau und Funktionsweise von 3D-MECHGRAPH	117
8.3.1	Grundelemente von 3D-MECHGRAPH	117
8.3.2	Interaktionstechniken	121
8.3.3	Grundlogik der Strukturdefinition	122
8.3.4	Erweiterte Möglichkeiten der Strukturdefinition	124
8.3.5	Import von domäneninternen und domänenübergreifenden Strukturdaten	125
8.3.6	Softwaretechnische Grundlagen	127
8.3.7	Erweiterungskonzept zur Visualisierung zeitlich variabler Strukturen	128
8.4	Evaluation von 3D-MECHGRAPH	131
8.4.1	Evaluationsrahmen	131
8.4.2	Identifizierte Verbesserungspotentiale der Visualisierung	136
8.4.3	Identifizierte Verbesserungspotentiale der Analyseunterstützung domänenübergreifender Strukturen	137
8.4.4	Identifizierte Verbesserungspotentiale der Interaktivität	141
8.4.5	Identifizierte Verbesserungspotentiale des Head Up Displays	142
8.5	Zusammenfassung	143
9	Weiterführende Konzepte zur funktionsorientierten Integration	145
9.1	Funktionale Integrationsstufen	145
9.2	Vernetzung des integrierten Produktmodells mit funktionsbezogenen Absicherungsaktivitäten	147
9.2.1	Spezifizierung funktionsbezogener Absicherungsaktivitäten	147
9.2.2	Verknüpfung von Funktionen und Absicherungsaktivitäten	149
9.2.3	Ableitung von Kommunikationsteams	152
9.3	Reflektion und Vernetzungspunkte zu weiteren Themenbereichen	154

10 Zusammenfassung und Ausblick	159
10.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	159
10.2 Ausblick	161
11 Literaturverzeichnis	165
12 Anhang	183
12.1 Konzepte für integrative Modellierungstechniken	183
12.2 Anwendungspotentiale 3D-MECHGRAPH	186
12.3 Glossar	191
13 Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung	193

1 Einleitung

1.1 Motivation

Steigende Produktkomplexität:

Seit seinen frühesten Anfängen hat sich das Automobil von einem rein mechanischen System mit Verbrennungsmotor zu einem System mit einem hohen Anteil an elektronischen und softwaretechnischen Komponenten sowie teilweise hybriden Antriebskonzepten gewandelt. Die Kombination von mechanischen, elektrischen und softwaretechnischen Komponenten wird weitläufig als Mechatronik bezeichnet (siehe Kapitel 2). Bis zu 90% der Innovationen der Automobiltechnik sind auf die Nutzung mechatronischer Systeme zurückzuführen [DAIS 2004, GROMER 2004]. Motiviert ist diese Wandlung insbesondere durch strengere Emissions- und Sicherheitsgesetze sowie die stark sinkenden Kosten elektronischer Komponenten. Die Zahl, der durch Software und Elektronik realisierten Funktionen, stieg daher in der näheren Vergangenheit rapide an und wird auch in den nächsten Jahren weiter stark wachsen. Hiermit verbunden ist eine erhebliche Zunahme des Wertanteils der Software- und Elektroniksysteme im Automobil [BRAESS & SEIFERT 2005, S. 597], [VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE 2005].

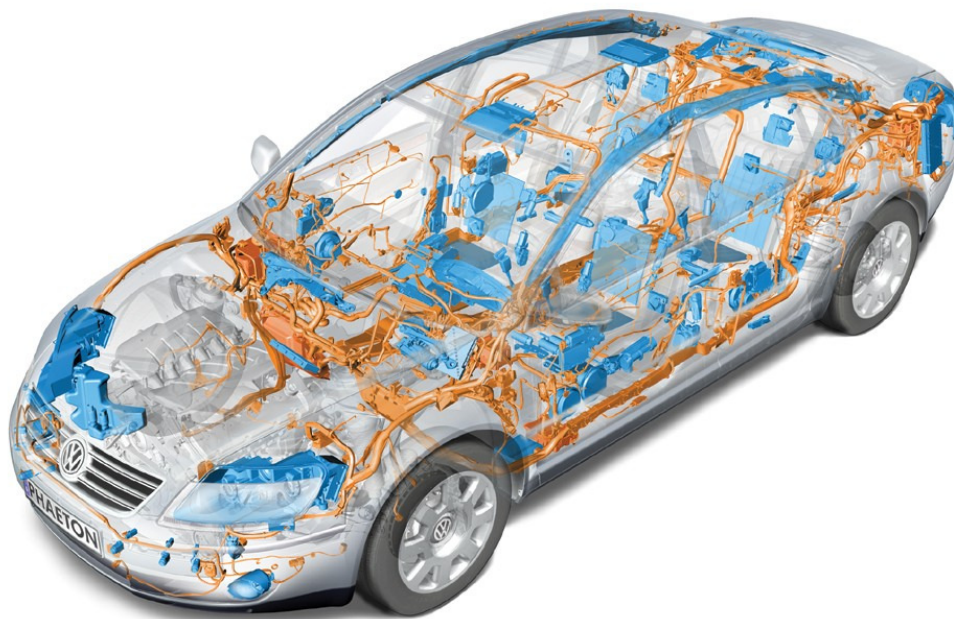


Abbildung 1-1: Hohe Komplexität durch starke Vernetzung: Bordnetz des VW Phaeton [VW 2008]

Informationstechnisch vernetzt sind die mechanischen, elektrischen und informationsverarbeitenden Teilsysteme in zentraler Weise über ein komplexes Bordnetz (siehe Abbildung 1-1). Der hohe Vernetzungsgrad ist, zusammen mit der hohen Anzahl an Funktionen, eine Hauptursache für die erhebliche Zunahme der Produktkomplexität [BOSCH 2007, S. 17], die den Automobilherstellern erhebliche Probleme bereitet. Extreme Gewährleistungskosten und unzufriedene Kunden sind Folgen der nicht beherrschten Komplexität (siehe Abbildung 1-2, vgl. [GAUSEMEIER ET AL. 2006, S. 18]).

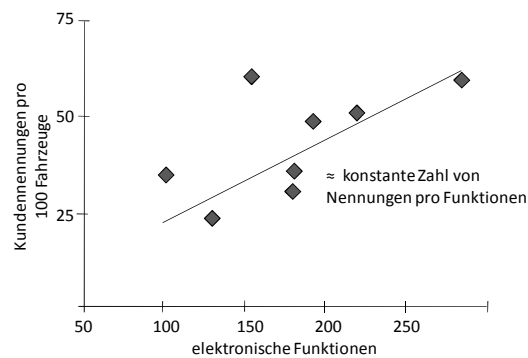


Abbildung 1-2: Qualitätsprobleme durch steigenden Funktionsumfang [BRAESS & SEIFFERT 2005, S.597]

Dabei muss zwischen „benötigter“ und „vermeidbarer“ Komplexität unterschieden werden. Vermeidbare Komplexität wird insbesondere durch eine unkontrollierte sowie nicht durch den Kunden wahrnehmbare Variantenvielfalt verursacht und muss durch das Variantenmanagement sowie Baukastenstrategien bewältigt werden (vgl. [SCHUH & SCHWENK 2001], [FRANKE ET AL. 2002]). Die darüber hinaus benötigte technische Komplexität kann auf Grund der starken Wettbewerbssituation sowie der weiteren Verschärfung von Sicherheits- und Emissionsgesetzen (vgl. [CALIFORNIA AIR RESSOURCE BOARD 2004]) nicht alleinig durch Verfolgung einer Reduzierungsstrategie bewältigt werden. MAURER [2007] fordert daher vielmehr die Entwicklung von Fähigkeiten zur Beherrschung der Produktkomplexität. Nur hierdurch können längerfristig Marktanteile erhalten und Wettbewerbsvorteile errungen werden.

Steigende Prozessqualität:

Die erhöhte Produktkomplexität verursacht durch die hohe Anzahl, der an der Entwicklung mechatronischer Systeme beteiligten Disziplinen, in Kombination mit dem hohen Zeitdruck und der starken Parallelisierung von Abläufen [EVERSHEIM & SCHUH 2005, S. 8] eine erhöhte Prozesskomplexität [WARKETIN & HERBST 2007]. Grundvoraussetzung für eine bessere Beherrschung der gestiegenen Produktkomplexität ist die effektivere Abstimmung der einzelnen Disziplinen beziehungsweise der Entwicklungsverantwortlichen. Zu beklagen ist jedoch, dass trotz der Verankerung von Simultaneous Engineering und den damit verbundenen interdisziplinären Teambesprechungen ein Mangel an disziplinübergreifender Kommunikation und interdisziplinärem System- und Problemverständnis besteht. Bedingt durch die hohe Arbeitsteilung und die damit häufig verbundene mangelnde Kommunikation

zwischen diesen Bereichen entstehen insbesondere in späten Phasen kostspielige Iterationen und Änderungen [REINHART ET AL. 1995]. WALTHER stellt diesbezüglich fest, dass Integrationsprobleme „auf die unzureichende Abstimmung des Gesamtsystems während der Entwicklung der Einzelkomponenten“ zurückzuführen sind [WALTHER 2001]. Einer integrativeren Zusammenarbeit zur Verbesserung dieses Umstandes stehen stark unterschiedliche Begriffswelten, Denk- und Vorgehensweisen der einzelnen Disziplinen entgegen [SCHÖN 2000, S. 51].

GÖPFERT [1998] stellt den Entwicklungsprozess als iterativen Zyklus aus den Schritten: „Generieren von Lösungen“, „Evaluieren“ und „Kritisieren“ dar. Erst wenn die Anforderungen in ausreichender Form erfüllt sind, kann dieser Zyklus beendet werden. Je effektiver und effizienter der interdisziplinäre Entwicklungsprozess gestaltet werden kann, desto weniger Iterationszyklen sind notwendig.

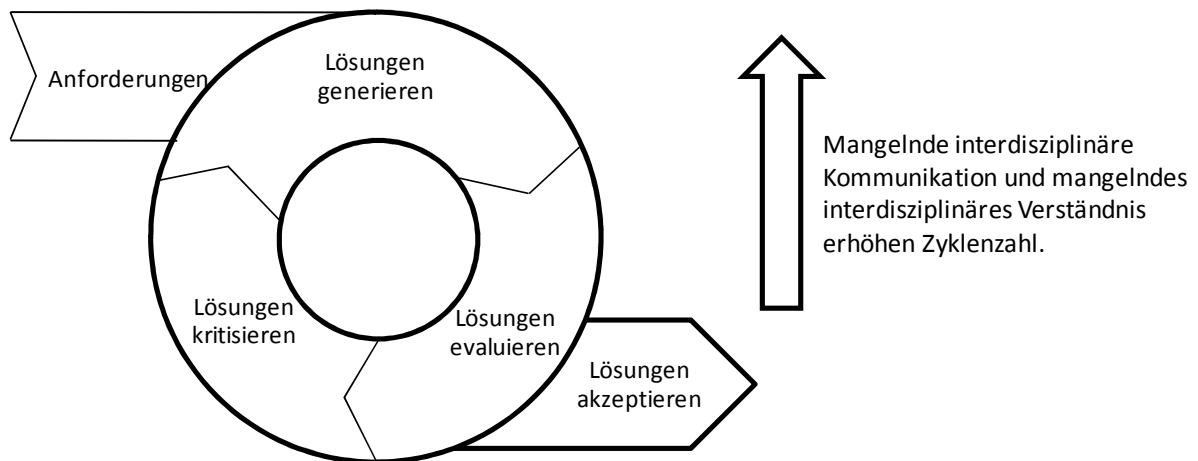


Abbildung 1-3: Zyklus aus Generieren, Evaluieren und Kritik an Lösungen [nach GÖPFERT 1998]

Die Unzulänglichkeiten der interdisziplinären Zusammenarbeit werden insbesondere im Rahmen von Absicherungsaktivitäten (Versuche, Simulationen, Berechnungen) aufgedeckt. Dies entspricht dem Schritt „Lösungen evaluieren“ im abgebildeten Zyklus. Absicherungsaktivitäten dienen der Überprüfung von Funktionen und Eigenschaften des Gesamtsystems oder dessen Teilsysteme und Komponenten. Hierfür müssen die disziplinspezifischen Entwicklungsergebnisse fristgerecht mit der benötigten Reife zusammengeführt und integriert werden. Häufig ist den einzelnen Entwicklungsverantwortlichen jedoch nicht klar, wer welche Entwicklungsergebnisse, wann und mit welcher Reife benötigt. Verantwortlichkeiten sind dabei zu wenig transparent oder nicht bekannt. Zusätzlich ist die Kommunikation zwischen den Absicherungs- und Entwicklungsverantwortlichen meist sehr mangelhaft ausgeprägt (vgl. [HERFELD 2007], [KLEEDÖRFER 1998]). Dies kann in Summe zu erheblichen Verzögerungen der Absicherungsaktivitäten oder zu verfälschten Ergebnissen führen und die Robustheit des Produktes stark negativ beeinflussen. Verstärkt wird die Problematik durch zu stark getrennte Prozesswelten der einzelnen Disziplinen [REICHART 2005].

Die mangelnde interdisziplinäre Kommunikation schlägt sich auch in einem mangelnden Verständnis struktureller Abhängigkeiten verantworteter Systembereiche nieder [SOSA ET AL. 2007]. Hierdurch werden insbesondere Probleme im funktionalen Zusammenspiel der einzelnen Teilsysteme verursacht, die jedoch häufig erst sehr spät im Entwicklungsprozess durch eine Absicherungsaktivität aufgedeckt werden. Hohe Änderungskosten sind die Folge. Die immer noch vorherrschenden klassischen bauteilorientierten Verantwortungsstrukturen fördern das dringend notwendige interdisziplinäre Denken und Handeln zu wenig und stoßen daher an Grenzen [BRAESS & SEIFERT 2005, S. 598]. Hinzu kommt, dass die Flut an Werkzeugen und Tools die Komplexität weiter erhöhen und bis dato nicht zu deren Beherrschung beitragen [WEBER 2005].

Die von LINDEMANN [2007] geforderte systematische und strukturierte Vorgehensweise unter Verwendung von Methoden ist zwar in Teilbereichen der Automobilentwicklung fest verankert, jedoch ist insbesondere in der Serienentwicklung die Anwendung interdisziplinär wirkender Methoden zur Systemmodellierung die Ausnahme. Eine Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses wird somit auch in dieser Hinsicht nur ungenügend umgesetzt.

Zusammenfassend stellt sich somit die Problemstellung für die Arbeit wie folgt dar:

- Zunahme der mechatronisch realisierten Funktionen und die damit verbundene starke Vernetzung der Teilsysteme führen zu einer steigenden Komplexität der Automobilsysteme.
- Zur Beherrschung der Produktkomplexität mangelt es an geeigneten Methoden, Strategien und Vorgehensweisen.
- Trend zur Mechatronik und starken Vernetzung der Teilsysteme bedingt Zunahme der Interdisziplinarität und somit der Komplexität des Entwicklungsprozesses.
- Unterschiedliche Begriffswelten, Denk- und Vorgehensweisen sowie intransparente Verantwortungsstrukturen erschweren die integrative Zusammenarbeit der einzelnen Teildisziplinen der Mechatronik.
- Disziplinübergreifende Abhängigkeiten der Teilsysteme innerhalb und zwischen den Bereichen Funktionen, Systemelemente und Verantwortliche sind den Entwicklungsbeteiligten häufig nicht bekannt und führen insbesondere bei Änderungen zu Problemen.
- Die Abhängigkeiten der einzelnen disziplinspezifischen Entwicklungsaktivitäten sind den Entwicklungsbeteiligten häufig nicht ausreichend bewusst. Dies führt insbesondere bei Absicherungsaktivitäten zu Integrationsproblemen.
- Zur Überwindung der Herausforderungen mangelt es an geeigneten Methoden, Vorgehensweisen und systemtechnischen Darstellungstechniken zur Förderung des interdisziplinären System- und Problemverständnisses sowie der interdisziplinären Kommunikation.

Motiviert durch die genannten Herausforderungen bei der interdisziplinären Entwicklung mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der

methodisch gestützten Erarbeitung zentraler interdisziplinärer Abhängigkeiten zwischen Funktionen, Systemelementen und Verantwortlichkeiten sowie deren transparenter Visualisierung. Hierdurch wird ein Beitrag zur Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses und der interdisziplinären Zusammenarbeit geliefert. Aufbauend auf den erarbeiteten Abhängigkeitsinformationen beschäftigen sich weiterführende Gedanken der Arbeit mit der systematischen Identifikation von Integrationsumfängen, die für die Absicherung von Funktionen benötigt werden, sowie mit der Ableitung von interdisziplinären Integrations- und Reflektionsteams.

Die Erfahrungsgrundlage der Arbeit wird folgend dargelegt.

1.2 Erfahrungsgrundlage der Arbeit

Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Ansätze zur Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit im Entwicklungsprozess mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme basieren auf den Erfahrungen, die der Autor in drei verschiedenen Projekten gesammelt hat.

Grundlegende Erkenntnisse zur systematischen Analyse des Produktentwicklungsprozesses und der damit verbundenen methodischen Aufnahme und Darstellungen der Beziehungen zwischen Rollen, Prozessschritten, Dokumenten und Komponenten flossen aus dem Projekt „Der Dienstleistungsmanager im Netzwerk der Zukunft“ ein [SCHUH ET AL. 2007]. Das genannte Projekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über eine Laufzeit von drei Jahren gefördert. Basierend auf Projekten mit diversen Industriepartnern wurden im Forschungsverbund mehrerer Lehrstühle Vorgehensweisen und Methoden zur Analyse und Optimierung entwicklungsbezogener Prozesse in wissensintensiven Unternehmensnetzwerken erarbeitet.

Der Lehrstuhl für Produktentwicklung der TU-München bearbeitete in diesem Rahmen zwei Industrieprojekte. Bei der Firma W.E.T. Automotive Systems AG, einem führenden Hersteller für Sitzheizungen, wurden zur Einführung eines PDM-Systems Geschäftsprozesse im Unternehmensnetzwerk analysiert, abgebildet und prototypenhaft umgesetzt [DIEHL & STÖBER 2007]. Herausforderung war in diesem Kontext insbesondere die Angleichung der Prozesswelten zwischen der Mutterfirma W.E.T. und ihrer damaligen Tochterfirma RUF, einem Hersteller für Automobilsensoren. Um dies zu erreichen wurde eine methodisch gestützte Analyse der jeweiligen Prozesswelten mit deren spezifischen Rollen, Prozessschritten, Dokumenten und Bauteilen durchgeführt. Erst durch die transparente Darstellung der Vernetzung zwischen diesen Betrachtungsbereichen konnten Angleichungspotentiale bewertet und Entscheidungen für eine stärkere Integration vorbereitet werden.

In einem zweiten Projekt innerhalb des Forschungsvorhabens „Der Dienstleistungsmanager im Netzwerk der Zukunft“ wurden die interdisziplinären Kommunikationsprozesse im Bereich der Entwicklung und Konstruktion der Firma Bauer Maschinen GmbH intensiv analysiert und Konzepte zur Verbesserung der erkannten Schwachstellen erarbeitet. Die Firma ist Hersteller für Baumaschinen und beliefert Kunden in der gesamten Welt. Die einzelnen Kunden stellen in Abhängigkeit des jeweiligen Bauprojektes unterschiedlichste

Anforderungen an die Maschinen. So sind die Baumaschinen dieser Firma meist Individualanfertigungen auf Basis einer bestehenden Grundstruktur. Im Laufe des Entwicklungsprozesses der einzelnen Maschinen können Änderungen durch die unterschiedlichen Entwicklungsbeteiligten ausgelöst werden. Die für einen effizienten Ablauf notwendigen Informationsflüsse insbesondere bei Änderungen wurden daher in Zusammenarbeit mit zentralen Vertretern der Disziplinen Hydraulik, Mechanik und Elektronik methodisch erarbeitet. Hierauf aufbauend wurden anschließend geeignete Konzepte zur softwaregestützten Verbesserung der interdisziplinären Kommunikation erarbeitet [DIEHL & ZIEGLER 2007].

Zwei für die vorliegende Arbeit maßgebliche Projekte fallen in die strategische Partnerschaft zwischen der BMW AG und der TU-München (CAR@TUM): Energiemanagement und MechaTUM. Ein Ziel des Projektes Energiemanagement war die systematische Analyse aller Energieflüsse eines Referenzfahrzeugs und deren transparente Darstellung [LINDEMANN & HÜBNER 2007]. Relevante Erkenntnisse, die hieraus in die vorliegende Arbeit einfließen, betreffen die geeignete Visualisierung hoch komplexer Abhängigkeiten innerhalb und zwischen verschiedenen Betrachtungsdomänen (mechanische, thermische, elektrische Verbraucher).

Das zentrale Projekt, aus dem die vorliegende Arbeit hervorgeht, stellt MechaTUM dar. MechaTUM wird seit dem Jahr 2005 von einem interdisziplinären Team verschiedener Lehrstühle der TU-München bearbeitet und war zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen. Das Projekt teilt sich grob in zwei Bereiche. Zum einen wurden im Zeitraum bis zur Erstellung dieser Arbeit innovative Konzepte und Prototypen für das komfortable Fahrzeug Ein- Aussteigen entwickelt, zum anderen wurden durch den Lehrstuhl für Produktentwicklung methodische Ansätze zur integrierten Gestaltung des mechatronischen Produktentwicklungsprozesses und zur Unterstützung der interdisziplinären Kommunikation erarbeitet [BRAUN ET AL. 2007], [DIEHL ET AL. 2008]. Die Analyse des interdisziplinären Entwicklungsprozesses mechatronischer Automobilsysteme wurde an den Betrachtungsobjekten „Schiebebedach“ und „Schlüsselloses Zugangssystem (Comfort Access)“ durchgeführt und konzentrierte sich auf die Phase der Serienentwicklung. Diese Betrachtungsbeispiele wurden auf Grund ihres hohen interdisziplinären Charakters gewählt. Für die identifizierten Herausforderungen wurden anschließend Verbesserungskonzepte erarbeitet, die anschließend am Beispiel der Entwicklung innovativer Ein- und Ausstiegssysteme verfeinert und evaluiert wurden.

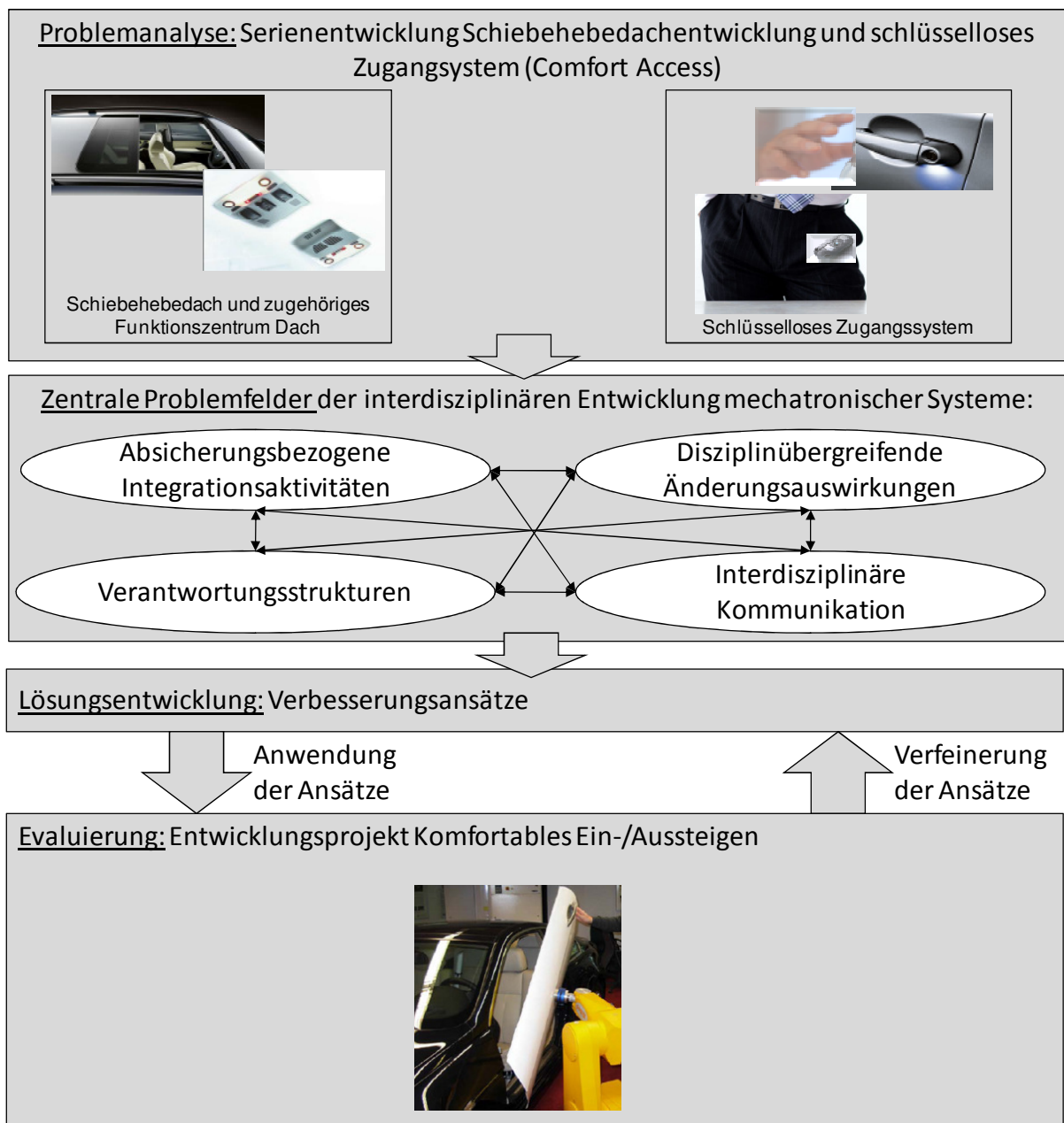


Abbildung 1-4: Erfahrungsgrundlage MechaTUM

Abbildung 1-4 zeigt die zentralen Herausforderungen, die im Rahmen der Prozessanalyse identifiziert wurden. Es finden sich die in Kapitel 1.1 angesprochenen Probleme der interdisziplinären Zusammenarbeit bei der Entwicklung mechatronischer Systeme wieder: Zu wenig Transparenz von Verantwortungsstrukturen, mangelnde Interdisziplinäre Kommunikation, nicht beachtete disziplinübergreifende Änderungsauswirkungen und Probleme bei absicherungsbezogenen Integrationsaktivitäten. Wie bereits angesprochen schlagen sich Unzulänglichkeiten der interdisziplinären Kommunikation sowie des

interdisziplinären Systemverständnisses meist in Integrationsproblemen und unzureichenden Absicherungsergebnissen nieder. Im Folgenden werden die Zielsetzungen, der in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze, in Bezug auf die Unterstützung bei der Bewältigung der dargestellten Problemfelder kurz erläutert.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die Ansätze der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf die Phase der Serienentwicklung mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme. Als zentrales Ziel des interdisziplinären Produktentwicklungsprozesses wird die Realisierung von Kundenfunktionen angenommen. Zusätzlich werden Funktionen als verbindendes Element zwischen den einzelnen Disziplinen der Mechatronik angesehen. Auf die interdisziplinäre Entwicklung von Produkteigenschaften wie Akustik und Crash wird im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefer eingegangen. Hierfür sei auf HERFELD [2007] und KLEEDÖRFER [1999] verwiesen.

Zentrale Zielsetzung, der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Ansätze, ist die Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses sowie der interdisziplinären Kommunikation in Bezug auf die Entwicklung mechatronisch realisierter Kundenfunktionen. Hierdurch soll ein Beitrag für eine bessere Integration der Einzeldisziplinen der Mechatronik geliefert werden. Abbildung 1-5 stellt die zentralen Ziele der Arbeit zusammenfassend dar.

Der obere Teil der Abbildung nimmt Bezug auf die entwickelte Visualisierungstechnik 3D-MECHGRAPH, die zur transparenten und domänenübergreifenden Darstellung von wichtigen interdisziplinären Abhängigkeiten dient. Als Domänen werden dabei Funktionen, Systemelemente und Verantwortliche (Personen) betrachtet. Die Visualisierungstechnik soll sowohl Relationen innerhalb als auch zwischen diesen Domänen darstellen und einen interaktiven Nachvollzug dieser Abhängigkeiten erlauben. Hierdurch soll das interdisziplinäre Systemverständnis sowie die interdisziplinäre Kommunikation gefördert werden. Zwar existieren in der Literatur vereinzelt Ansätze, die sich mit einer umfassenden Abbildung von Abhängigkeiten beschäftigen (insbesondere [STEINMEIER 1998] [GENDERKA 1994] vgl. Kapitel 8.2), jedoch sind diese für eine interaktive und transparente Visualisierung domänen- und disziplinübergreifender Abhängigkeiten unzureichend. Betrachtungsdomänen sind im Kontext dieser Arbeit Funktionen, Systemelemente und Verantwortlichkeiten (Personen). Ausgangsbasis des entwickelten Visualisierungsansatzes stellt die durch MAURER [2007] erarbeitete Methodik zu Abbildung und Darstellung komplexer Strukturen in Form von sogenannten „Multidomainmatrices (MDMs)“ und stärkebasierten Graphen dar. Dieser Ansatz wird aufgenommen und durch die Schaffung der domänenübergreifenden Visualisierungstechnik 3D-MECHGRAPH erweitert.

Da die zu visualisierende Abhängigkeiten üblicher Weise nicht vollständig vorliegen, wird unterstützend ein methodisches Vorgehen für deren Erarbeitung vorgeschlagen. Dabei wird zurückgegriffen auf klassische Methoden wie relationsorientierte Funktionsmodelle und Funktionshierarchien aber auch auf spezielle Modellierungstechniken für mechatronische Systeme. (vgl. [VDI 2004], [KALLMEYER 1998], [GEHRKE 2005]).

Unter Nutzung der erarbeiteten Abhängigkeiten zwischen Funktionen, Systemelementen und Entwicklungsverantwortlichen wurde ein weiterführendes Konzept zur Integration der Teildisziplinen für funktionsbezogene Absicherungsaktivitäten abgeleitet. Zentrale Annahme, die hinter diesem Ansatz steht, ist die Betrachtung des Serienentwicklungsprozesses als eine stufenweise Entwicklung von Kundenfunktionen. Die einzelnen Stufen werden durch Absicherungsaktivitäten begrenzt. In diesen Absicherungsaktivitäten werden Funktionsumfänge durch den Aufbau von Teilsystemen, die aus mehreren Systemelementen bestehen, überprüft. Wie bereits erwähnt, wird die Absicherung von Eigenschaften wie Akustik oder Crash nicht betrachtet. Ziel des Ansatzes ist es, die jeweiligen Funktions- und Systemelementverantwortlichen, der für eine Absicherung einer Funktion benötigten Entwicklungsumfänge, zu identifizieren und durch die Bildung von interdisziplinären Kommunikationsteams die notwendigen Integrationsprozesse effizienter zu gestalten. Hierdurch soll ein Beitrag zur reibungslosen Zusammenführung der disziplinspezifischen Entwicklungsaktivitäten geliefert werden. Das entwickelte funktionsorientierte Integrationsmodell stellt weiterführende Gedanken dar, die auf Basis der methodischen Erarbeitung der zentralen Abhängigkeitsinformationen und deren Visualisierung durch 3D-MECHGRAPH entstanden sind. In einer Folgearbeit sollten die Ansätze des funktionsorientierten Integrationsmodells detailliert evaluiert werden.

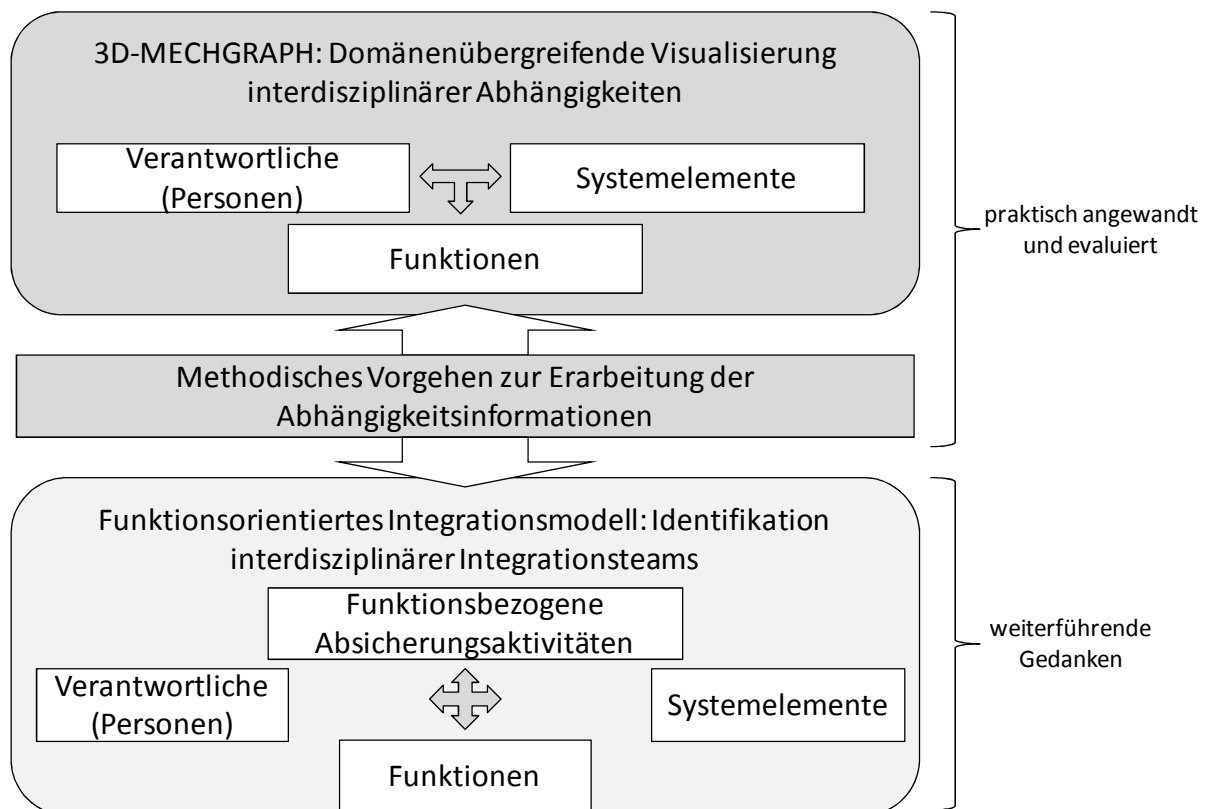


Abbildung 1-5: Zentrale Ziele der Arbeit

1.4 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1-6 zeigt die grobe Struktur der vorliegenden Arbeit. Ausgehend von der in Kapitel 1.1 geschilderten Motivation werden in den Kapiteln 2 bis 4 für die Arbeit wichtige Grundlagen beschrieben. Zunächst wird der Begriff Mechatronik genauer definiert. Anschließend geht Kapitel 3 detaillierter auf die Systemtechnik sowie wichtige Vorgehensmodelle und Strategien der Produktentwicklung ein. In diesem Rahmen werden der Systembegriff und der Komplexitätsbegriff erläutert. Erweitert wird diese Betrachtung um die Vorstellung verschiedener Systemmodellierungstechniken. Die Vorgehensmodelle werden folgend differenziert nach ihrem Bezug zur Mechatronik behandelt. Abgeschlossen wird Kapitel 3 durch die Behandlung zentraler Strategien der Produktentwicklung. Der Bezug zum Betrachtungsfokus (die Entwicklung mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme) wird in Kapitel 4 hergestellt. Hierzu wird die Rolle der Mechatronik als Innovationsmotor diskutiert und grundlegende Strukturen mechatronischer Fahrzeugsysteme aufgezeigt. Darüber hinaus wird an dieser Stelle der übliche Ablauf der Fahrzeugentwicklung mit den wichtigsten Phasen vorgestellt. In diesem Kontext werden ebenfalls die wichtigsten Absicherungsaktivitäten behandelt.

Aufbauend auf den behandelten Grundlagen analysiert Kapitel 5 detaillierter die zentralen Herausforderungen in der Serienentwicklung. Zunächst wird die gravierende Wandlung der Produktstruktur des Automobils seit seiner Erfindung durch Carl Benz hin zu einem hochvernetzten und hochkomplexen mechatronischen System diskutiert. Anschließend werden am Beispiel der Schiebebedachentwicklung sowie der Entwicklung eines schlüssellosen Zugangssystems die sich hieraus ergebenden Herausforderungen der erhöhten Interdisziplinarität analysiert. Bezugnehmend auf die extreme Wandlung der Fahrzeugstruktur wird folgend der Bedarf einer stärkeren Funktionsorientierung in Ablauf und Aufbauorganisation abgeleitet. Die diesem Bedarf entgegenstehenden Strukturen in bestehenden Prozessen, Verantwortungsbereichen sowie der Mangel an komplexitätsreduzierenden Werkzeugen, Methoden und Vorgehensweisen werden in den nächsten Teilkapiteln aufgezeigt.

In Kapitel 6 wird eine Eingrenzung, der durch die zuvor aufgezeigten Herausforderungen motivierten Lösungsansätze, vorgenommen. Anschließend wird in Kapitel 7 am Beispiel der Entwicklung des komfortablen Einstiegsystems eine methodisch gestützte Erarbeitung von Abhängigkeitsinformationen aufgezeigt. Ausgangspunkt stellen die zentralen Kundenfunktionen dar, die anschließend mit funktionsrealisierenden Systemelementen sowie Verantwortlichkeiten verknüpft werden. Die Abbildung der Abhängigkeiten in Form einer Multidomainmatrix wird in Kapitel 8 als Datenbasis für die entwickelte domänen- und disziplinübergreifende Visualisierungstechnik verwendet. In diesem Kapitel werden zunächst die Grenzen bestehender Darstellungsansätze diskutiert. Anschließend wird das entwickelte Tool 3D-MECHGRAPH zur Visualisierung disziplin- und domänenübergreifender Abhängigkeiten detailliert vorgestellt. Die Anwendungspotentiale und Funktionalitäten werden evaluiert und darauf aufbauend Optimierungskonzepte für die erkannten Verbesserungspotentiale beschrieben.

Weiterführende Gedanken zur Integration der Teildisziplinen der Mechatronik finden sich in Kapitel 9. Die in Kapitel 7 erarbeiteten Abhängigkeitsdaten werden dabei verwendet, um ein

funktionsorientiertes Integrationsmodell zu entwickeln. Dieses zielt auf eine reibungslosere Zusammenführung der disziplinspezifischen Entwicklungsaktivitäten zu funktionsbezogenen Absicherungsaktivitäten ab. Hierzu wird ein Schema zur Spezifizierung von Absicherungsaktivitäten vorgeschlagen. Auf dieser Basis werden anschließend Funktionen mit Absicherungsaktivitäten verknüpft und in Kombination mit den bereits erarbeiteten Verantwortungszuordnungen Kommunikationsteams abgeleitet.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf Weiterentwicklungspotentiale der entwickelten Ansätze. Im Anhang finden sich erweiterte Modellierungsansätze zur vernetzten Aufnahme von Funktionen und Systemelementen sowie eine Konzeptsammlung zusätzlicher Anwendungsbereiche des Visualisierungstools 3D-MECHGRPAH.

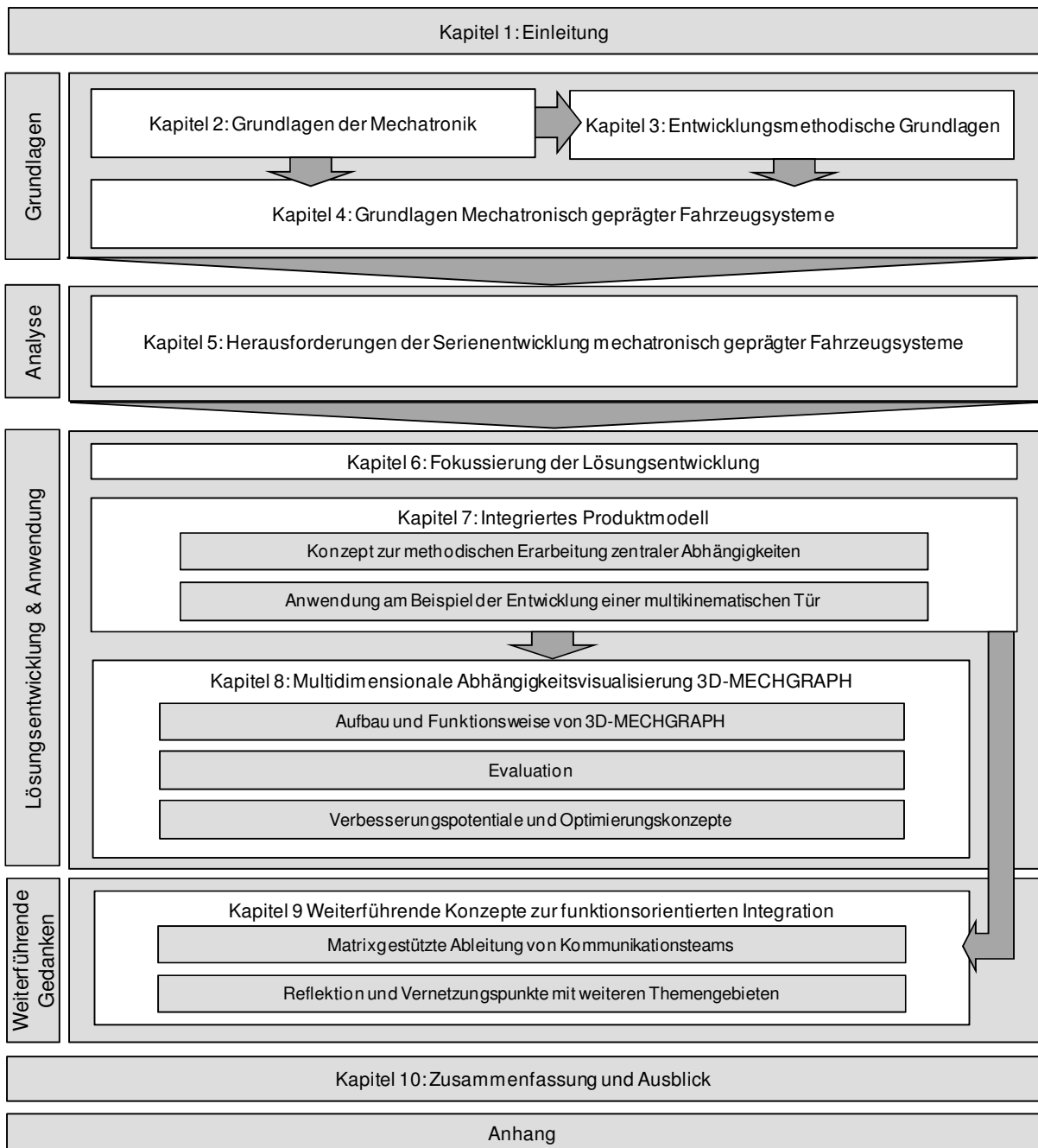


Abbildung 1-6: Struktur der Arbeit

2 Grundlagen der Mechatronik

2.1 Definition Mechatronik

Mechatronik ist ein Kunstwort und setzt sich zusammen aus den Wörtern Mechanik und Elektronik. Der Begriff „Mechatronics“ wurde durch Ko Kikuchi, Präsident der YASKAWA Electric Corporation, geprägt [HARASHIMA 1996]. Von 1971 bis 1982 war Mechatronik ein eingetragener Handelsname. Entsprungen ist die Mechatronik aus dem Bereich der Feinwerktechnik. Mechatronik steht jedoch mittlerweile für das synergetische Zusammenwirken von mechanischen, elektrischen, elektronischen und informationstechnischen Komponenten innerhalb eines Systems. Somit vereint die Mechatronik die Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik/Elektronik, Regelungstechnik und Informationstechnik [KRAUSE ET AL. 2006, S.35; vergleiche auch SCHWEITZER 1989, GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000, S.9; ISERMANN 2008, S.18; VDI 2004]. ISERMANN merkt an, dass der Übergang zwischen mit der Elektronik integrierten Systemen und mechatronischen Systemen fließend ist [ISERMANN 2008, S.18F]. Aussagen zur Motivation und Auswirkung der verstärkten Nutzung von Elektrik und Elektronik in verschiedenen Bereichen des Maschinenbaus lassen sich somit auch auf die Mechatronik übertragen.

FELGEN führt folgende Motivationsgründe für die verstärkte Nutzung von mechatronischen Systemen auf [FELGEN 2007, S.44 mit Verweis auf LIPPOLD 2001, S. 14F; MÖHRINGER 2004, S. 6FF; VDI 2004, S. 18F]:

- Kosteneinsparung und optimiertes Preis-Leistungsverhältnis
- Einsparung von Bauraum und Gewicht
- Senkung des Energieverbrauchs
- Verbesserung von Funktionen und Systemverhalten
- Generierung neuer Funktionen
- Individualisierung durch stärker Adaption an den Nutzer
- Adaptive und lernfähige Systeme

Die Anwendungsbereiche mechatronischer Systeme sind sehr vielfältig. Sie reichen von der Medizintechnik bis zur Automobiltechnik. So sind neue Ansätze in der Prothetik ohne das Zusammenwirken mechanischer, elektrotechnischer und informationstechnischer Systemelemente nicht denkbar. Ebenso können Reduzierungen von Emissionswerten neuer Verbrennungsmotoren nur mit Hilfe mechatronischer Systeme realisiert werden. GAUSEMEIER & FRANK [2006, S.2] teilen mechatronische Systeme in Bezug auf ihren Anwendungsfokus ein in räumlich integrierte Systeme und Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten. Räumlich integrierte Systeme zeichnen sich durch die Minimierung des Bauraums bei gleichzeitiger Konstanz an Funktionalität aus. Das Maximum dieses

Minimierungsbestrebens wird durch die Mikrosystemtechnik verfolgt [vgl. HILLERINGMANN 2006].

Mechatronische Systeme weisen trotz dieser unterschiedlichen Anwendungsfelder eine gemeinsame Grundstruktur auf. Diese besteht nach GAUSEMEIER [2002] aus einem mechanischen Grundsystem, Aktoren, Sensoren und einer Informationsverarbeitung. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese mechatronischen Komponenten unter dem neutralen Begriff Systemelemente zusammengefasst (siehe Kapitel 7.1). Die Vernetzung der Systemelemente erfolgt über verschiedene Arten von Schnittstellen: geometrisch, materiell, energetisch, informationstechnisch [PONN & LINDEMANN 2008, S. S.146].

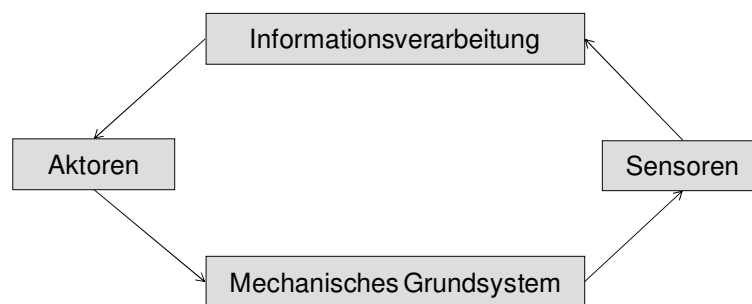


Abbildung 2-1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [GAUSEMEIER 2002]

Primäre Funktionen des mechanischen Grundsystems sind nach ISERMANN die Gewährleistung des Kraft- bzw. Drehmomentflusses, die Übertragung des mechanischen Energiestroms oder die Erzeugung bestimmter Bewegungen und Bewegungsvorgänge [ISERMANN 2008, S.19]. Erweitert wird das System durch elektronische Bauteile in Form von Sensoren und Aktoren. Diese sind mit der informationsverarbeitenden Einheit verbunden. Die informationsverarbeitende Einheit verwertet die Signale der Sensoren und steuert auf deren Basis die Aktoren. Sie dient somit der Steuerung, Regelung, Überwachung und des Managements [ISERMANN 2008, S.26]. Wird die Informationsverarbeitung in Form von Mikrocontrollern mit den Sensoren integriert, spricht man von intelligenten Sensoren (Smart Sensors). Analog bezeichnet man die Integration von Aktoren und Mikrocontrollern als intelligente Aktoren (Smart Actors) [ISERMANN 2008, S. 25]. Interagiert der Mensch direkt mit dem mechatronischen System, so wird die Grundstruktur um eine Mensch-Maschine-Schnittstelle erweitert [GAUSEMEIER 2001 ET AL.]. Über diese kann der Benutzer Sollwerte vorgeben und Informationen über den Zustand des Systems erhalten.

Da der steuerungs- und regelungstechnische Charakter von mechatronischen Systemen von zentraler Bedeutung ist, lässt sich das System mit seinen Funktionen auch in Form von Blockschaltbildern modellieren.

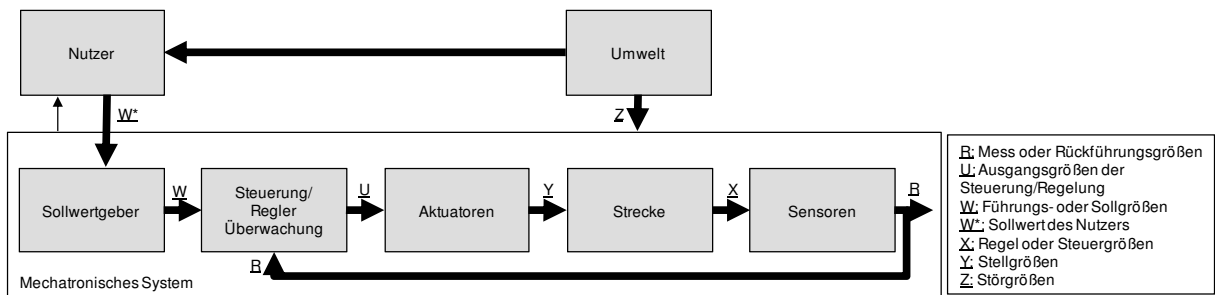


Abbildung 2-2: Blockschaltbild eines mechatronischen Systems [nach SCHÄUFFELE & ZURAWKA 2004, S. 38]

Der Nutzer gibt einen Sollwert W^* über die Mensch-Maschine-Schnittstelle vor. Der Sollwertgeber liefert auf dieser Basis die Sollgröße W an die Steuerungs- und Regelungseinheit. Diese berechnet dann aus der Sollgröße W und der Messgrößen B der Sensoren die Ausgangsgrößen U für die Aktuatoren. Die Aktuatoren wiederum beeinflussen die Regelstrecke über Stellgrößen Y . Kontrolliert wird die Regelstrecke durch die Sensoren. Hierdurch können ungewollte Beeinflussungen aus der Umwelt (Störgrößen Z) abgefangen werden.

LÜCKEL [2000] bezeichnet die in Abbildung 2-1 dargestellte Grundstruktur im Kontext der Hierarchisierung komplexerer mechatronischer Systeme als „Mechatronisches Funktionsmodul“. Das zugehörige Grundprinzip ist folgend dargestellt.

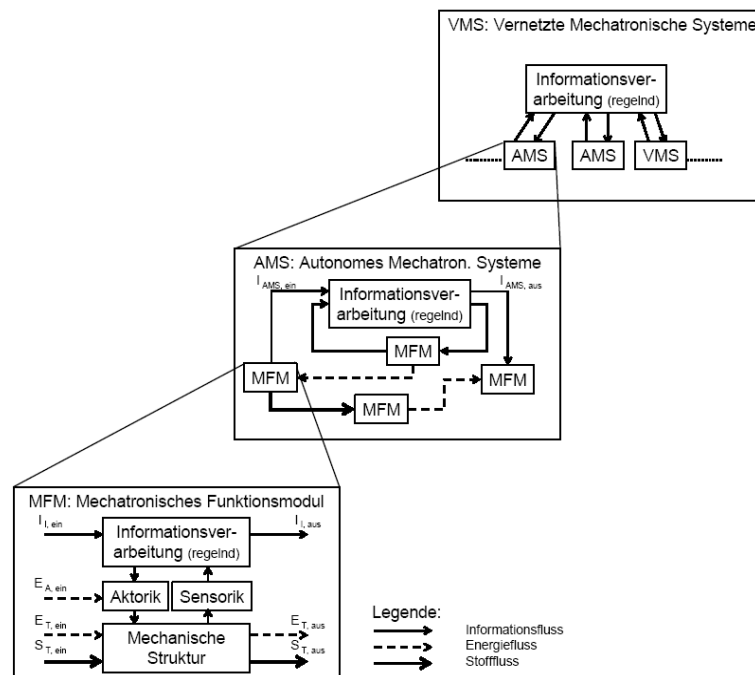


Abbildung 2-3: Hierarchische Struktur komplexer mechatronischer Systeme [LÜCKEL 2000]

Mehrere Funktionsmodule bilden nach LÜCKEL [2000] ein „Autonomes Mechatronisches System“ wenn diese informationstechnisch zum Beispiel über ein BUS-System miteinander gekoppelt sind. Die Höchste Hierarchieebene bilden „Vernetzte Mechatronische Systeme“. Dies sind mehrere „Autonome Mechatronische Systeme“ die durch Informationsverarbeitung miteinander gekoppelt sind. Abbildung 2-3 zeigt die beschriebene hierarchische Struktur komplexer mechatronischer Systeme: Als zentrale Relationstypen (Schnittstellen) zur Beschreibung der Vernetzung zwischen den einzelnen Elementen werden gemäß VDI-Richtlinie 2206 der Informationsfluss, der Energiefluss und der Stofffluss herangezogen [VDI 2004, S. 14F].

2.2 Entwicklungstrends

Folgende Technologien stellen KRAUS ET AL. [2006, S. 53FF] als wichtige Entwicklungstrends der Mechatronik dar:

- Spritzgegossene Schaltungsträger (Moulded Interconnected Devices - MID)
- Selbstoptimierende Systeme
- Rekonfiguration
- Ad-hoc-Netzwerke
- Minisensorik/Aktorik
- Intelligente Werkstoffe

Die MID-Technologie erlaubt das Auftragen von Leiterbahnen auf spritzgegossene dreidimensionale Kunststoffteile. Hierdurch können insbesondere mechanische und elektronische Komponenten miteinander vereinigt werden. Wesentliche Vorteile dieser Technologie sind die hohe Funktionsdichte, die Reduzierung der Teilezahl und die räumliche Gestaltungsfreiheit. Ein weiterer Vorteil der aufgeführt wird, ist die höhere Recyclingfähigkeit von MID-Teilen im Vergleich zu klassischen Leiterplatten. [GAUSEMEIER & PEITZ 2006, FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V. 2008]

Der Sonderforschungsbereich 614 beschäftigt sich mit selbstoptimierenden Systemen. „Intelligente, autonome Systeme, die flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen reagieren“ werden als selbstoptimierend bezeichnet [GAUSEMEIER ET AL. 2005]. Eng hiermit verknüpft ist die flexible Rekonfiguration von Hardware.

Ad-hoc Netzwerke bieten neue Potentiale für die Vernetzung mechatronischer Systeme. Unter Ad-hoc Netzwerken werden sich selbst aufbauende drahtlose Netzwerke verstanden [PERKINS 2001]. Hierdurch ergeben sich räumliche Einsparungspotentiale, da weniger Verkabelung benötigt wird. Die Minimierung des Platzbedarfs wird auch durch die Miniaturisierung von Sensoren und Aktoren vorangetrieben (vgl. Mikrosystemtechnik).

Der letzte aufgeführte Punkt der intelligenten Werkstoffe bezieht sich auf Werkstoffe, die sich selbständig an äußere Veränderungen anpassen.

3 Entwicklungsmethodische Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Ansätze zur methodischen Entwicklung von technischen Produkten sowie zur Planung und Gestaltung des zugehörigen Produktentwicklungsprozesses. Zunächst wird auf Grundlagen der Systemtechnik sowie domänenspezifische Vorgehensmodelle eingegangen. Anschließend folgen Ansätze, die speziell auf die systematische und methodische Entwicklung mechatronische Systeme ausgerichtet sind. Abschließend werden ausgewählte Strategien der Produktentwicklung behandelt.

3.1 Strukturierung entwicklungsmethodischer Ansätze

Ziel eines Unternehmens ist es den Gewinn zu maximieren. Um dies zu ermöglichen müssen Kosten, Qualität und Zeit optimiert werden. Hierzu sind systematische und methodische Ansätze erforderlich. Übergeordnete Strategien der Produktentwicklung gleichen sich daher in der Verfolgung zielorientierter Handlungsweisen, einem systemorientierten Denken sowie der Gestaltung von Vorgehens- und Verhaltensweisen [LINDEMANN 2007 S.14F]. Dies wiederum wirkt sich direkt und indirekt auf die Bereiche Aufbauorganisation, Prozessgestaltung und Team sowie Individuum aus. Hierzu integrieren Strategien wie Simultaneous Engineering, Integrierte Produktentwicklung, Fraktale Unternehmen, Projektmanagement oder Total Quality Management unterschiedlichste Methoden, Vorgehensmodelle und Werkzeuge. Abbildung 3-1 stellt die genannten Gemeinsamkeiten der verschiedenen Strategien dar.

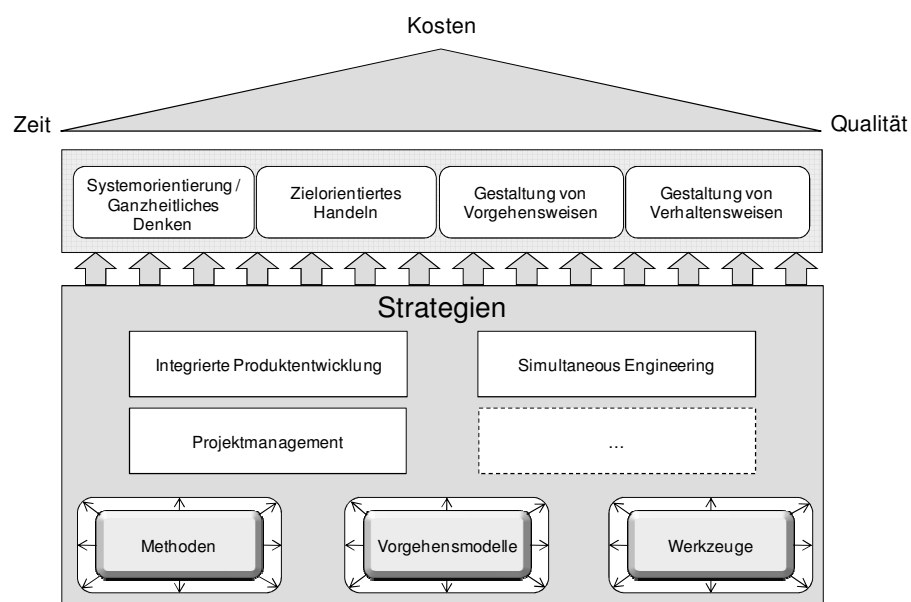


Abbildung 3-1: Gemeinsamkeiten von Strategien der Produktentwicklung (nach [LINDEMANN 2007, S.14F])

Bevor auf Vorgehensmodelle als eine wichtige Basis für die Strukturierung von Produktentwicklungs- und Problemlöseprozessen eingegangen wird und ausgewählte Strategien vorgestellt werden, beschäftigt sich das folgende Kapitel mit Grundlagen der Systemtechnik. Die Systemtechnik bietet Denkweisen und Systemmodellierungstechniken, die zur Beherrschung der mechatronischen Komplexität unabdingbar sind.

3.2 Grundlagen der Systemtechnik

Die Systemorientierung wird von DAENZER & HUBER als „Denkweise verstanden, die es ermöglicht, komplexe Erscheinungen (= Systeme) besser verstehen und gestalten zu können“ [DAENZER & HUBER 1999, S.4]. Dies beinhaltet Modellierungstechniken zur zweckgebundenen Abstraktion, Begrifflichkeiten zur Beschreibung und Ansätze, die das ganzheitliche Denken unterstützen. Zentraler Ausgangspunkt ist das System. Daher sollen im Folgenden der Begriff System und zugehörige Definitionen erläutert werden.

3.2.1 Begriffsklärung System

Nach DAENZER & HUBER [1999] besitzt ein System eine Systemgrenze und enthält mehrere Elemente, die untereinander in Beziehung stehen. Die Systemgrenze wird in Abhängigkeit des Betrachtungsfokus mehr oder weniger willkürlich gezogen. Systeme sind meistens offen und können somit ebenfalls Beziehungen zum Umfeld oder Umfeldsystemen aufweisen. Von Umfeldsystemen wird gesprochen, wenn der Systemcharakter betont werden soll. Abbildung 3-2 stellt die angesprochenen Eigenschaften eines Systems und weitere Aspekte des Systembegriffs am Beispiel des Schiebebedachs (SHD) in einem Auto dar.

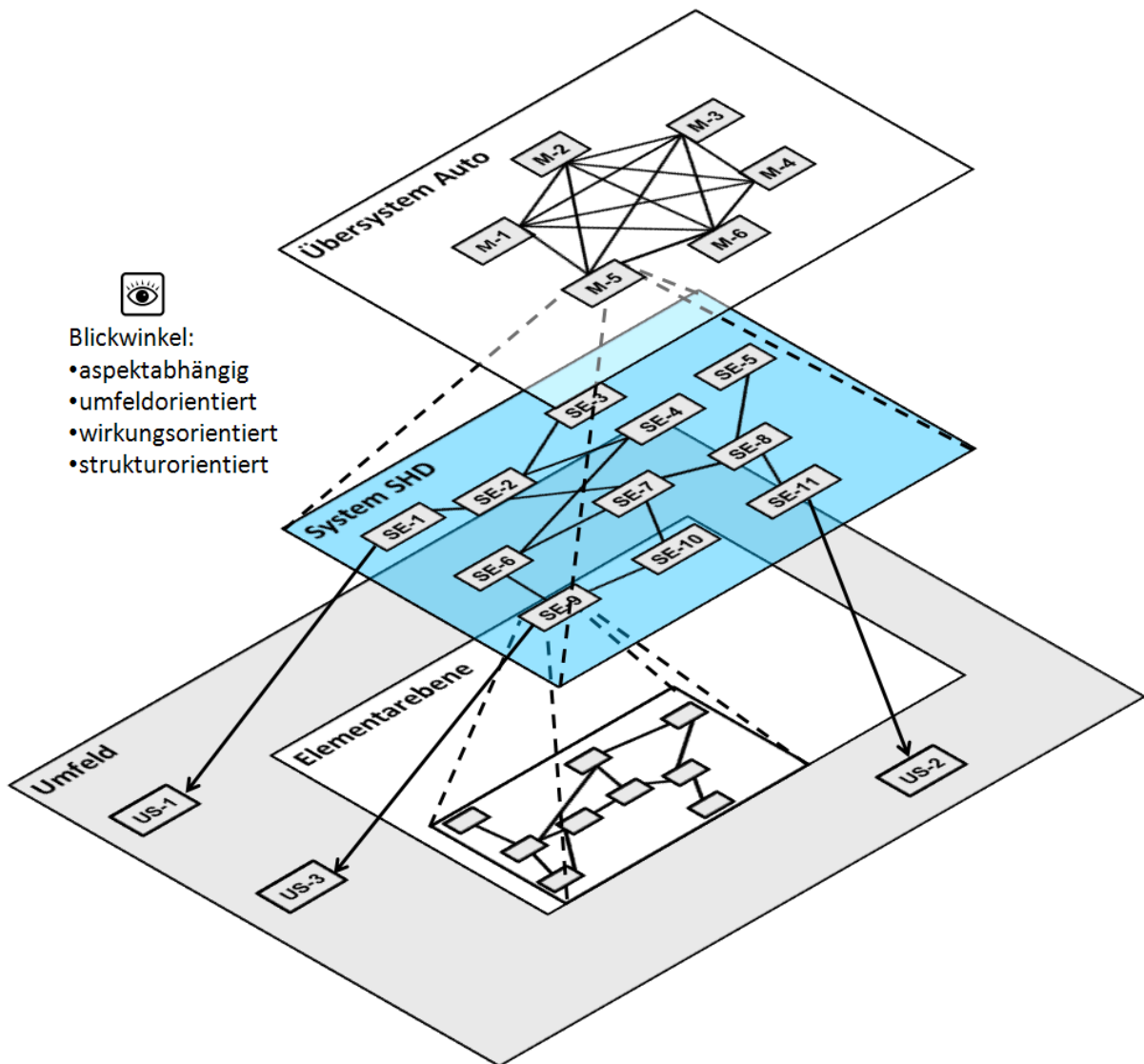


Abbildung 3-2: Schaubild zur Erläuterung des Systembegriffs am Beispiel Schiebebebedach (SHD)

Betrachtet man ein System als Teil eines größeren Ganzen so spricht man von einem **Übersystem** [DAENZER & HUBER 1999]. In Bezug auf das Beispiel Schiebebebedach wäre dies das gesamte Auto, welches aus verschiedenen „Teilsystemen“ (M-1 bis M-6) besteht, von denen eines das dargestellte Schiebebebedach ist. Erhöht man den Detaillierungsgrad der Betrachtung so können einzelne Elemente eines Systems weiter in Unterelemente aufgegliedert werden. Man spricht dann von **Untersystemen**. So wird in Abbildung 3-2 das Element SE-9 weiter aufgegliedert. SE-9 könnte beispielsweise dem Motor des Schiebebebedachs entsprechen. In einer weiteren Aufgliederung würden dann die einzelnen Bauteile des Elektromotors und deren Beziehungen untereinander erscheinen.

Die abgebildeten drei Ebenen repräsentieren eine Systemhierarchie. Die unterste Ebene einer Systemhierarchie nennt man Elementarebene. Zwischen dem betrachteten System und der Elementarebene können je nach Betrachtungsweise und System verschieden viele Untersystemordnungen (bildlich Hierarchieebenen) liegen [DAENZER & HUBER 1999].

Die abgebildeten Beziehungen der Elemente eines Systems sind stark vom Blickwinkel abhängig. Es können also mehrere Aspekte eines Systems abgebildet werden. Die einzelnen Abbilder repräsentieren dann jeweils unterschiedliche Relationstypen zwischen den Elementen. So können in Bezug auf das Beispiel Schiebehebedach getrennte Betrachtungen aus energetischer, informationstechnischer oder stofflicher Sicht von Interesse sein.

Der Blickwinkel auf das System kann neben den unterschiedlichen Aspekten auch zwischen einer eher systemabgegrenzten Sicht und einer umfeldorientierten Sicht wechseln. Bei einer umfeldorientierten Betrachtungsweise steht die Wechselwirkung des Systems mit seinem Umfeld im Vordergrund.

Möchte man das System eher aus wirkungsorientierter Sicht betrachten, so helfen Vereinfachungen in Form von sogenannten Black-Box Darstellungen. Bei einer Black-Box interessieren die inneren Abläufe des Systems nicht. Das System wird auf eine abstrakte Stufe gehoben, bei der lediglich die Ein- und Ausgangsgrößen betrachtet werden. Dies hilft komplexe Zusammenhänge vereinfacht darzustellen.

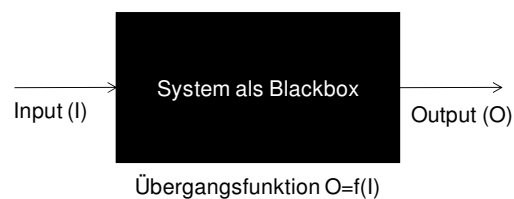


Abbildung 3-3: Wirkungsorientierte Betrachtung mit System als Blackbox (nach [Daenzer & Huber 1999, S.11])

Die wirkungsorientierte Sicht findet sich auch in der Definition eines Systems nach PAHL ET AL. wieder. PAHL ET AL. definieren ein System als eine „Gesamtheit geordneter Elemente, z.B. Funktionen oder technische Gebilde, die aufgrund ihrer Eigenschaften durch Relationen verknüpft und durch eine Systemgrenze umgeben sind“. Über die Ein- und Ausgangsgrößen des Systems kann das Systemverhalten gezeigt werden [PAHL ET AL. 2005, S.750]. Eine sehr kompakte Zusammenfassung der in diesem Kapitel angesprochenen Systembegriffe liefert IGENBERGS mit folgender Definition eines Systems: „Ein System besteht aus Elementen. Elemente sind über Relationen miteinander verknüpft. Elemente haben Attribute, Eigenschaften und Funktionen. Elemente können Systeme sein.“ [IGENBERGS 1993, S. 12].

3.2.2 Begriffsklärung Struktur

DAENZER & HUBER definieren die Struktur eines Systems als das Gefüge welches Elemente und Beziehungen (zwischen diesen) bilden. Elemente und Beziehungen weisen eine Ordnung

auf, die es erlaubt Anordnungsmuster beziehungsweise Ordnungsprinzipien zu erkennen [DAENZER & HUBER 1999, S.6]. In Abbildung 3-2 wird durch die verschiedenen Ebenen eine hierarchische Struktur erkennbar. Darüber hinaus ist in der obersten Ebene eine Netzwerkstruktur und in der Ebene des Schiebehebendachs eine Kreisstruktur beziehungsweise ein Kreisschluss der Elemente SE-6 bis SE-10 zu erkennen. VDI-Richtlinie 2221 definiert die „Struktur“ als Darstellung der Teile einer Gesamtheit inklusive der Relationen zwischen diesen.

MAURER [2007] beschäftigt sich im Rahmen der Komplexitätsbeherrschung mit der Struktur des Systems und daraus ableitbaren Maßnahmen. Die Struktur definiert MAURER als „...Netzwerk welches durch die Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen geformt wird.“ Er sieht die Struktur als ein wesentliches Attribut des Systems an. Des Weiteren "...kann die Struktur des Systems durch die Beschreibung der spezifischen Verknüpfungen der Systemelemente beschrieben werden" [MAURER 2007, S. 32].

In der Produktentwicklung existieren verschiedene Modellierungstechniken, die verschiedene strukturelle Aspekte des Produktes abbilden. Im Folgenden wird auf die für diese Arbeit wichtigsten Modellierungstechniken eingegangen. Auf prozessbezogene Modelle wird im Rahmen von Kapitel 3.4.3 eingegangen.

3.2.3 Klassische strukturbezogene Produktmodelle

In Bezug auf das Produkt bestehen verschiedene Strukturdarstellungen, die unterschiedliche Aspekte beleuchten. Klassische Strukturdarstellungen sind die Funktionsstruktur, die Wirkstruktur oder die Baustruktur. Es existieren aber auch spezifische Strukturen, die für die einzelnen Bereiche des „Design for X“ vorgesehen sind. So beispielsweise montageorientierte Produktstrukturen.

Typischer Weise wird die Entwicklung der Funktionsstruktur als Grundlage für die Suche nach Prinziplösungen gesehen [VDI 2221] (vgl. 3.3). Die Funktionsstruktur wird nach PAHL & BEITZ durch die Aufgliederung einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen realisiert [PAHL & BEITZ 2005, S. 43]. Dies beinhaltet sowohl einen hierarchischen Aspekt der Aufgliederung, als auch einen strukturellen, der die Vernetzung der Teilfunktionen abbildet. GÖPFERT spricht im Falle der parallelen Abbildung dieser beiden Aspekte von einem Systemmodell [GÖPFERT 1998, S.87].

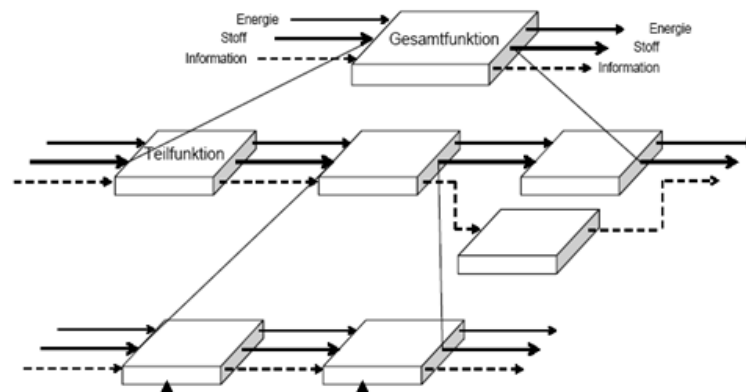


Abbildung 3-4: Funktionsstruktur [PAHL & BEITZ 2005, S 43]

Der hierarchische Aspekt der Funktionsstruktur nach PAHL & BEITZ kann auch durch Funktionsbäume oder hierarchische Funktionsstrukturen dargestellt werden [BALZERT 2000, S. 124] [EHRENSPIEL 2007, S. 396]. Diese Darstellungen zeigen jedoch nicht auf, wie die Teilfunktionen untereinander vernetzt sein müssen, um die Oberfunktion zu realisieren.

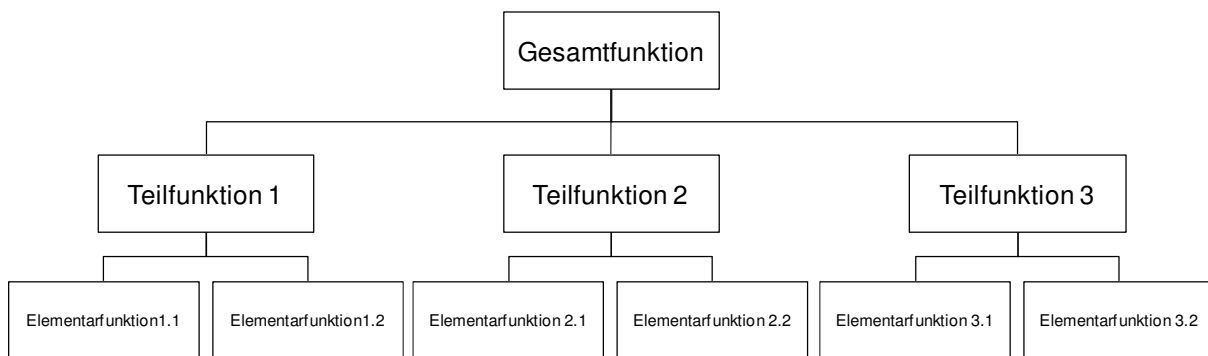


Abbildung 3-5: Hierarchische Funktionsstruktur

Für die Modellierung der funktionalen Vernetzung existieren verschiedene Methoden wie beispielsweise: relationsorientierte, nutzerorientierte oder umsatzorientierte Funktionsmodelle [LINDEMANN 2007, S. 117 FF]. Die unterschiedlichen Modellierungstechniken erlauben die funktionale Betrachtung des Systems aus verschiedenen Perspektiven: Nutzerinteraktion, Stoff- Energie- Signalumsatz, Relationen zwischen den Funktionen. Für Software und Elektrotechnik existieren spezialisierte Modelle, wie beispielsweise Geschäftsprozessdiagramme, Sequenz-Diagramme, Unified Modelling Language (UML), Datenflussdiagramme, Blockschaltbilder oder Zustands-Übergangdiagramme (vgl. [BALZERT 2000], [SCHÄUFFELE & ZURAWKA, 2004]).

Wie bereits erwähnt dienen Funktionsmodelle als Basis für die gezielte Suche nach Wirkprinzipien zur Realisierung der Teilfunktionen. Darauf aufbauend stellt die Wirkstruktur die „Verknüpfung von Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zum Erfüllen der Gesamtfunktion dar“ [PAHL & BEITZ 2005, S. 751]. Diese Verknüpfung der Wirkprinzipien

wird häufig in Form eines Ordnungsschemas wie zum Beispiel dem Morphologischen Kasten [ZWICKY 1966] realisiert. Die Kombination der Wirkstrukturen mündet meist in der Erstellung einer Prinzipskizze [PAHL & BEITZ 2005, S. 227].

Ein weiterer wichtiger Begriff in diesem Kontext ist die Produktstruktur. Nach PAHL & BEITZ legt die Produktstruktur die Baugruppen und Hauptbauteile fest [PAHL & BEITZ 2005, S.]. Die Produktstruktur ist nach diesem Verständnis eine hierarchische Struktur und wird synonym mit dem Begriff Baustruktur verwendet. Im Englischen entspricht dies dem Begriff productarchitecture. Dies ist etwas verwirrend, da unter Produktarchitektur auch die Kombination aus Funktionsstruktur und Baustruktur inklusive der Transformationsbeziehungen zwischen diesen verstanden wird [GÖPFERT 1998, S. 75]. In gleicher Weise beschreiben ULRICH & EPPINGER die Architektur eines Produktes als die Übersetzung von Funktionen in physische Einheiten [ULRICH & EPPINGER 1995, S.132]. Abbildung 3-6 zeigt die für diese Arbeit geltende Definition der Produktarchitektur nach GÖPFERT [1998].

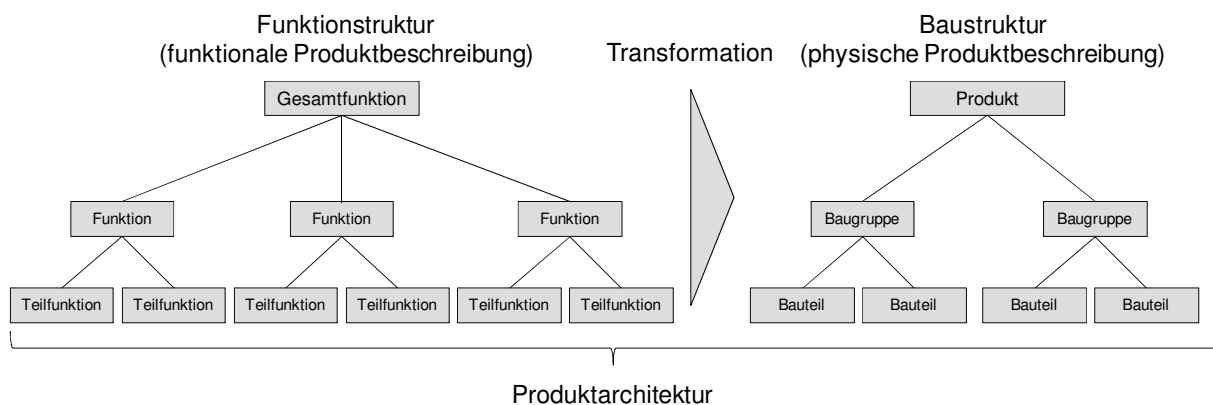


Abbildung 3-6: Produktarchitektur [GÖPFERT 1998 S.75]

GÖPFERT [1998] sieht die Erstellung der Produktarchitektur als einen wesentlichen Teil der Produktentwicklung. Durch die Erstellung der Produktarchitektur werden funktionale Modelle in eine physikalische Beschreibung übersetzt. Diverse Ansätze beschäftigen sich mit Produktarchitekturen aus Sicht der Montage. Modulare Produktarchitekturen, Architekturen mit Baukästen und Integrale Produktarchitekturen sind Strategien, die in Bezug auf montage- und fertigungsgerechte Gestaltung intensiv in der Wissenschaft diskutiert werden (vgl. [ANDREASEN 1985], [MEERKAM 1998], [RENNER 2007]).

Um bestehende Systeme und ihre Struktur unter verschiedenen Aspekten abzubilden, haben sich Matrizen und Graphen bewährt. Diese werden folgend gesondert vorgestellt.

3.2.4 Matrizen zur Modellierung von Systemen und deren Strukturen

DAENZER & HUBER [1999, S.6] empfehlen im Rahmen des Systemsengineering als Hilfsmittel für die Darstellung und Aufnahme von Strukturen Graphen und Matrizen. Die

Verknüpfungsinformationen eines Systems oder eines bereits als Graph modellierten Systems lassen sich strukturiert und sehr systematisch in Form von Matrizen abbilden [LINDEMANN 2007], [BROWNING 2001]. Hierzu werden die Elemente in Spalten und Zeilen gegenübergestellt. In den einzelnen Kreuzungsfeldern lassen sich die Verknüpfungsinformationen festhalten. Liegen lediglich ungerichtete Verbindungen vor, so ist es ausreichend eine Diagonalhälfte zu befüllen. Neben einer rein binären Abbildung der Information „Abhängigkeit vorhanden“ lässt sich alternativ auch die Stärke der Abhängigkeit hinterlegen.

In der Wissenschaft wird zwischen Matrizen, die Elemente eines Typs gegenüberstellen, und Matrizen, die verschiedene Typen gegenüberstellen, unterschieden. Die Elementtypen werden üblicherweise als Domänen bezeichnet. Matrizen, die Elemente einer Domäne gegenüberstellen, werden als „*Design Structure Matrices*“ (DSMs) bezeichnet. Diese Bezeichnung geht zurück auf STEWARD [1981], der sich bereits in den 1960er Jahren mit Matrizen als Hilfsmittel zur Analyse des Systemdesigns beschäftigte [STEWART 1962]. Seither haben sich zahlreiche Anwendungsfelder und Forschungsrichtungen für DSMs etabliert. Hierzu zählen insbesondere die Bereiche:

- Gestaltung, Analyse und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen
- Gestaltung, Analyse und Optimierung von Produkten und Produktarchitekturen

BROWNING [2001] gibt in seiner Arbeit einen umfassenden Überblick über etablierte DSM Anwendungen. Er unterteilt diese Anwendungen in vier Klassen:

Tabelle 3-1: DSM Anwendungsklassen [BROWNING 2001]

Komponentenbasierte / Architektur-DSM	Teambasierte / Organisations-DSM	Aktivitätsbasiert, Aufgabenbasiert/ Planungs-DSM	Parameterbasiert/ Systemnahe Planungs- DSM
--	-------------------------------------	--	--

Komponentenbasierte DSMs werden verwendet, um die Produktstruktur abzubilden und unter verschiedenen Gesichtspunkten wie zum Beispiel dem Modularisierungspotential zu analysieren. In Bezug auf die Gestaltung von organisatorischen Aspekten werden Informationsflüsse zwischen Personen und Gruppen in Organisations-DSMs abgebildet. DSMs werden ebenfalls für die optimierte Gestaltung von Abläufen eingesetzt. BROWNING unterscheidet dabei zwischen aufgabenbasierten DSMs und parameterbasierten beziehungsweise systemnahen DSMs.

Unter die genannten Bereiche fallen viele weitere Anwendungsgebiete, wie Kostenoptimierung von Produkten und Prozessen [BROWNING & EPPINGER 2002], Individualisierung von Produkten [LINDEMANN 2005], Modularisierung und Dekomposition [SOSA 2005] oder die Verfolgung von Änderungsauswirkung [CLARKSON ET AL. 2001]. Die Analyse der in einer DSM abgebildeten Strukturen kann durch manuelle oder automatisierte

Anwendung geeigneter Algorithmen vereinfacht werden [BROWNING 2001]. Zentrales Mittel ist die Neuordnung der Zeilen und Spaltenreihenfolge. Interpretationsziele können beispielsweise das Erkennen von Clustern oder Kreisschlüssen sein. MAURER betont in diesem Zusammenhang, dass unterschiedliche Aspekte einer Struktur häufig nur durch unterschiedliche Anordnungen erkennbar sind. Daher weisen Matrizen häufig Grenzen bei der Darstellung struktureller Eigenschaften eines Systems auf [MAURER 2007, S.103].

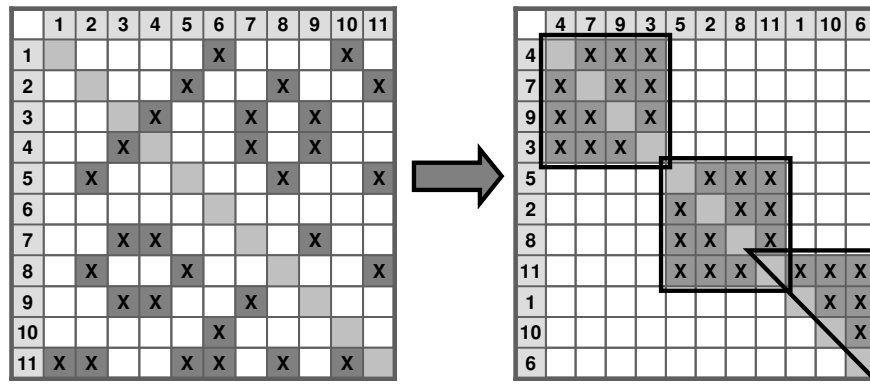


Abbildung 3-7: Zeilen-/Spaltentransformation zur Darstellung von Clustern [MAURER 2007, S.102]

Neben der Darstellung der Vernetzung von Elementen der gleichen Domäne existieren verschiedene Ansätze zur Darstellung der Vernetzung von Elementen unterschiedlicher Domänen. Hierzu zählt die sogenannte „Domain Mapping Matrix“ (DMM) [DANILOVIC, M. & BÖRJESSON 2001A], [DANILOVIC, M.; BÖRJESSON 2001B]. EPPINGER & SALMINEN [2001] verknüpfen die Bereiche Prozess, Produktstruktur und Organisation in Form mehrerer DMMs. Zentrale Fragestellungen, die durch diese Gegenüberstellung beantwortet werden sollen, sind:

- Spiegelt der Entwicklungsprozess die Produktstruktur wieder?
- Entsprechen die organisatorischen Kommunikationsstrukturen den Abhängigkeiten der Produktstruktur?
- Führt die Organisatorische Struktur den Produktentwicklungsprozess richtig aus?

EPPINGER & SALMINEN stoßen in Bezug auf die Erfassung und Integration indirekter Abhängigkeiten an Grenzen. Die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Betrachtungsdomänen sind meist nicht eindeutig definiert. So ist beispielsweise auf Grund von Multiprojektarbeit nicht immer eine eindeutige Zuordnung von Teammitglied zu Prozessschritt möglich. EPPINGER & SALMINEN sehen daher ein großes Potential in der Entwicklung einer geeigneten Methodik die die domänenübergreifenden Abhängigkeiten integriert abbildet [EPPINGER & SALMINEN 2001].

MAURER diskutiert in diesem Kontext intensiv die Notwendigkeit einer holistischen Betrachtung von Abhängigkeiten über Domänengrenzen hinweg. Hierfür erweitert MAURER

die DMM und DSM Methodik zu einer so genannten Multiple Domain Matrix (MDM). Der prinzipielle Aufbau eine Multiple Domain Matrix ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

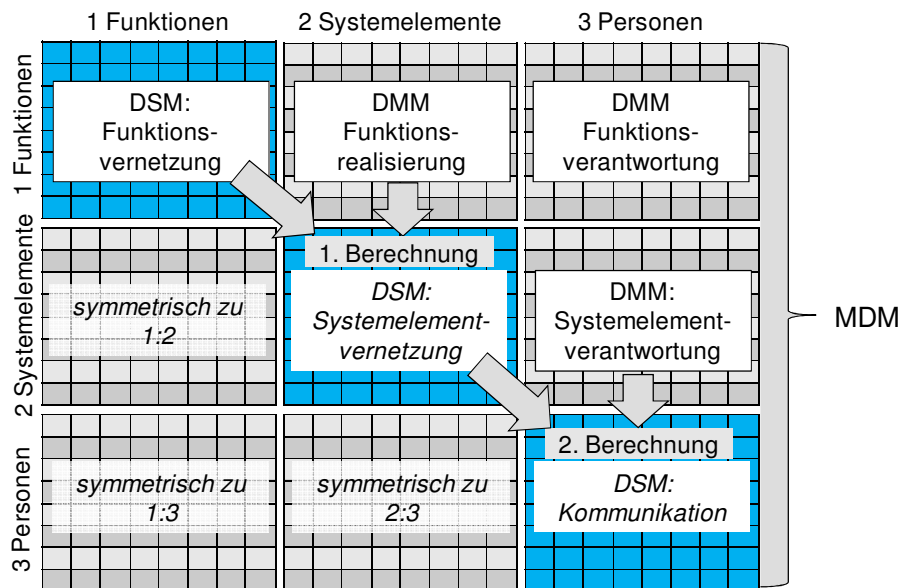


Abbildung 3-8: Beispielhafter Aufbau einer Multiple Domain Matrix (nach [MAURER 2007])

In einer Multiple Domain Matrix lassen sich Abhängigkeiten über verschiedene Domänen hinweg systematisch abbilden. Das Beispiel zeigt die Betrachtungsdomänen Funktionen, Systemelemente und Personen. Diese werden systematisch gegenübergestellt um sowohl Abhängigkeiten innerhalb einer Domäne als auch Abhängigkeiten zwischen zwei unterschiedlichen Domänen darzustellen. Kreuzungsfelder in denen zwei Domänen aufeinander treffen gehören zu einer DMM. Kreuzungsfelder der MDM in denen Elemente einer Domäne gegenüberstehen, werden zu DSMs gezählt. Diese liegen auf der blau hervorgehobenen Diagonale. Die DMMs links und rechts der Diagonale können symmetrisch sein, können jedoch auch unterschiedliche Abhängigkeitsaspekte zwischen den jeweiligen Domänen abbilden. Im gezeigten Beispiel sind die Abhängigkeiten symmetrisch. So bildet die DMM 1:2 die Frage ab, welche Systemelemente welche Funktionen realisieren. Diese ist symmetrisch zur DMM 2:1. In Bezug auf die, durch EPPINGER & SALMINEN [2001] identifizierte, Schwierigkeit verschiedene Betrachtungsdomänen zu vernetzen, bietet die MDM-Methodik nach MAURER die Möglichkeit DSM Verknüpfungen aus anderen Betrachtungsbereichen abzuleiten. Dies ist im dargestellten Beispiel exemplarisch für die DSM der Systemelemente und der Personen aufgezeigt. Im ersten Fall lässt sich aus der Information, welche Funktionen mit einander vernetzt sind und der Information durch welche Systemelemente diese realisiert werden, ableiten, wie die zugehörige Vernetzung der Systemelemente aussehen sollte. Bildlich gesprochen projiziert die DMM *Funktionen – Systemelemente* die funktionale Vernetzung auf die Betrachtungsebene der Systemelemente. Analog kann aus der Kombination der DSM *Systemelemente – Systemelemente* und der DMM

Systemelemente – Personen die notwendige Kommunikationsstruktur (wer sollte mit wem sprechen?) abgeleitet werden. Die Kommunikationsstruktur ist also bedingt durch die Abhängigkeiten der einzelnen Systemelemente und der Verantwortlichkeiten für diese. Abhängigkeiten, die entweder nur durch zeitraubende Interviews oder Datenerfassungen aufgenommen werden können, lassen sich mit Hilfe dieser Domänenverknüpfungslogik schnell und systematisch herleiten [MAUER 2007]. Dies erlaubt eine holistische Analyse von Systemen unter unterschiedlichen Aspekten. Folgende Abbildung zeigt sechs mögliche Mechanismen zur Ableitung von Abhängigkeiten. Die Darstellung bezieht sich auf gerichtete Abhängigkeiten. Für ungerichtete Abhängigkeiten bleibt die prinzipielle Logik jedoch gleich.

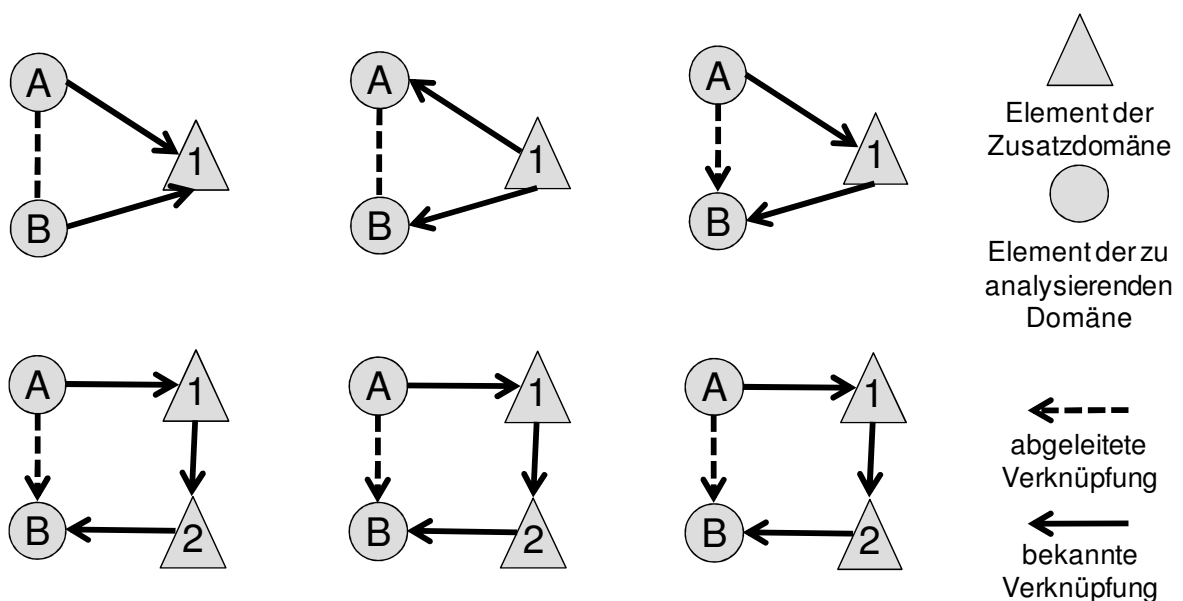


Abbildung 3-9: Domänen-Verknüpfungslogik zur Ableitung von DSMs [MAURER 2007, S.85]

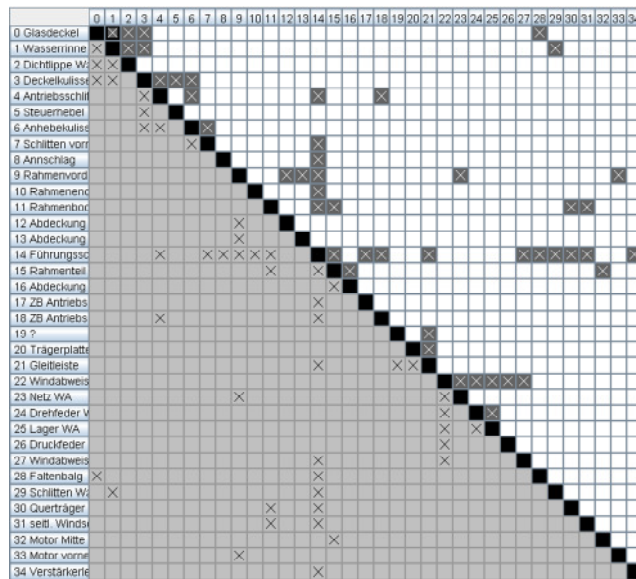
3.2.5 Graphen zur Modellierung von Systemen und deren Strukturen

Graphen beinhalten Knoten und Kanten. Die Kanten verbinden die Knoten und können gerichtet oder ungerichtet sein [DAENZER & HUBER 1999, S.13]. In Bezug auf ein System entsprechen die Knoten den Elementen des Systems und die Kanten den Schnittstellen zwischen diesen. Somit kann ein Relationsorientiertes Funktionsmodell ebenso als Graph aufgefasst werden wie ein Wirkungsnetz.

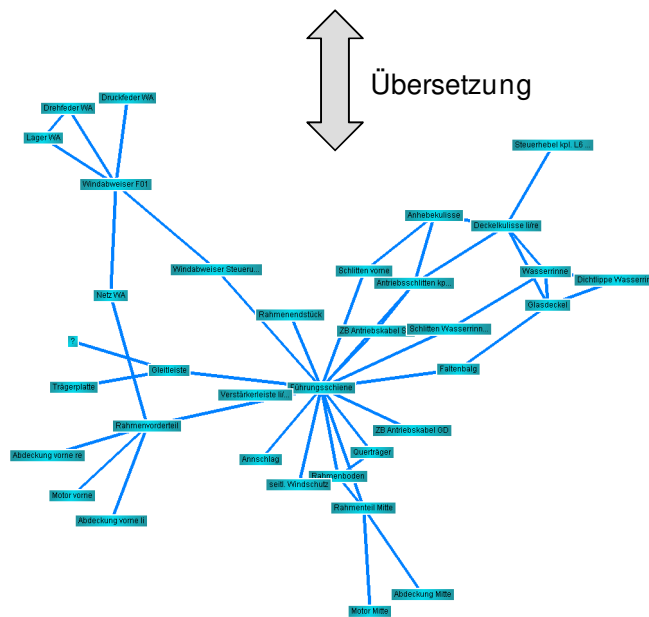
Die Graphentheorie beschäftigt sich als Teilgebiet der Mathematik mit Graphen und deren Eigenschaften. Sie bietet Algorithmen zu deren Analyse sowie verschiedene Methoden zu deren Darstellung [GROSS & YELLEN 2006]. Da eine Matrix lediglich eine andere Repräsentationsform eines Graphen ist, bietet die Graphentheorie Ansätze zur Lösung von matrixspezifischen Problemen [BRUALDI & RYSER 1991, S. 23FF]. Wie bereits angesprochen, können durch die Reorganisation von Matrizen jeweils nur spezifische Struktur Aspekte

hervorgehoben werden [MAURER 2007, S. 103]. Daher ist zur intuitiven Analyse eine geeignete Visualisierung der in der Matrix beschriebenen Struktur erforderlich. Repräsentationen in Form von Graphen bieten das Potential verschiedene Strukturaspekte gleichzeitig gut interpretierbar darzustellen. Eine große Anzahl an prinzipiellen Visualisierungsmöglichkeiten findet sich auf VISUALCOMPLEXITY [2007]. Jedoch sind die meisten Darstellungsmechanismen nicht geeignet strukturelle Aspekte zu analysieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Visualisierung von mechatronischen Systemen und deren Abhängigkeiten der durch MAURER verwendete Ansatz zur Kopplung von Matrizen mit stärkebasierten Graphen verwendet. MAURER betont mit Verweis auf DI BATTISTA ET AL. [1999, p. 303ff] die Eignung von stärkebasierten Graphen für die strukturelle Analyse von Systemen. In stärkebasierten Graphen stoßen sich die einzelnen Knoten gegenseitig ab und werden durch Kanten angezogen. Die Anziehungskräfte der Kanten lassen sich gewichten, wodurch die Knoten näher aneinander rücken [MAURER 2007]. Die im vorherigen Kapitel angesprochene Domänenverknüpfungslogik zur Ableitung von DSMs sowie die Visualisierung von DSMs in Form von stärkebasierten Graphen sind bereits softwaretechnisch umgesetzt und kommerziell verfügbar [TESEON 2008]. Gekoppelt ist die entsprechende Software mit verschiedenen Funktionen zur detaillierten Analyse und Optimierung der DSM-bezogenen Struktur. Folgende Darstellung zeigt die Struktur der Bauteile eines Schiebehebbedachs zum einen in Form einer DSM und zum anderen in Form eines stärkebasierten Graphen.



Symmetrische DSM: Bauteile eines Schiebedachs mit physischem Kontakt



Zugehöriger stärkerbasierter Graph

Abbildung 3-10: Transformation von Matrizen in Graphen

3.2.6 Komplexität von Systemen

STEINMEIER [1998] gliedert die Komplexität mit Bezug auf PATZAK [1982] in die Varietät und die Konnektivität auf. Die Varietät ist bestimmt durch die Anzahl der Elemente und die Verschiedenartigkeit dieser. Konnektivität bezieht sich stärker auf den strukturellen Charakter des Systems und wird beeinflusst durch die Anzahl und Verschiedenartigkeit der Beziehungen.

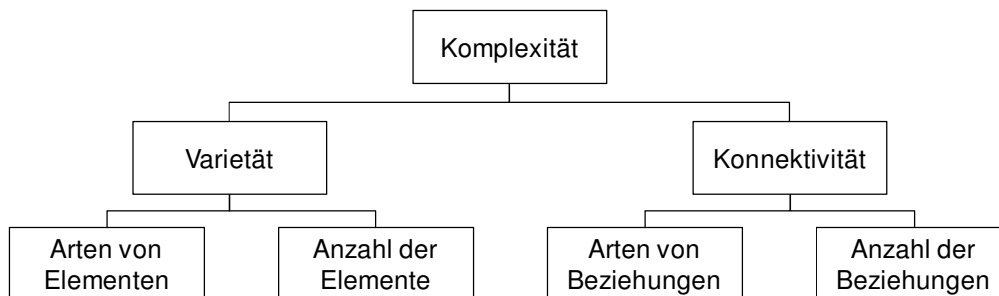


Abbildung 3-11: Aufgliederung der Komplexität [STEINMEIER 1998]

WEBER [2005] führt produktbezogen die durch Varianten verursachte Komplexität ein. Zusätzlich erweitert WEBER den Komplexitätsbegriff durch Einbezug die Dimension Prozess. Hierzu zählt er die organisatorische und disziplinbezogene Komplexität. Er ordnet darüber hinaus den Dimensionen der Komplexität strategische Komponenten des Managements zu. Dies sind Produkt-/Systemkomplexität, Produkt-/Systemvarianten, Entwicklungszeit und Arbeitsverteilung und -organisation.

Einen weiteren wichtigen Komplexitätsaspekt, der in Abbildung 3-11 nicht berücksichtigt ist, stellt die Dynamik eines Systems dar. MALIK bezieht die Anzahl der Zustände, die ein System einnehmen kann und die damit verbundene Unbestimmtheit des Systems als ein zentrales Merkmal von Komplexität ein [MALIK 2003, S.186]. In der Wissenschaft hat sich der Forschungszweig System Dynamics gebildet. System Dynamics stellt eine Methode zur ganzheitlichen Analyse und Simulation komplexer dynamischer Systeme dar. Jay W. Forrester gilt als Begründer des System Dynamics [FORRESTER 1961, 1969, 1971]. Das Systemdenken ist integraler Bestandteil des System Dynamics. Viele Anwendungsbeispiele des Systems Dynamics stammen aus dem sozio-ökonomischen Bereich.

DÖRNER [1992] diskutiert die Komplexität im Zusammenhang mit menschlichem Versagen und den dadurch ausgelösten Fehlern und Katastrophen, wie beispielweise die Explosion des Tschernobyl Reaktors. Nach DÖRNER „...ergibt sich der Grad an Komplexität aus dem Ausmaß in dem verschiedene Aspekte eines Realitätsausschnittes und ihre Verbindungen beachtet werden müssen, um eine Situation in dem jeweiligen Realitätsausschnitt zu erfassen und Handlungen zu planen“ [DÖRNER 1992, S.60].

In Bezug auf die effektive und effiziente Beherrschung von Komplexität betont MAURER [2007], dass mehrere zusammenspielende Aspekte holistisch betrachtet werden müssen. Dies

sind Marktkomplexität, Produktkomplexität, Organisationskomplexität und Prozesskomplexität.

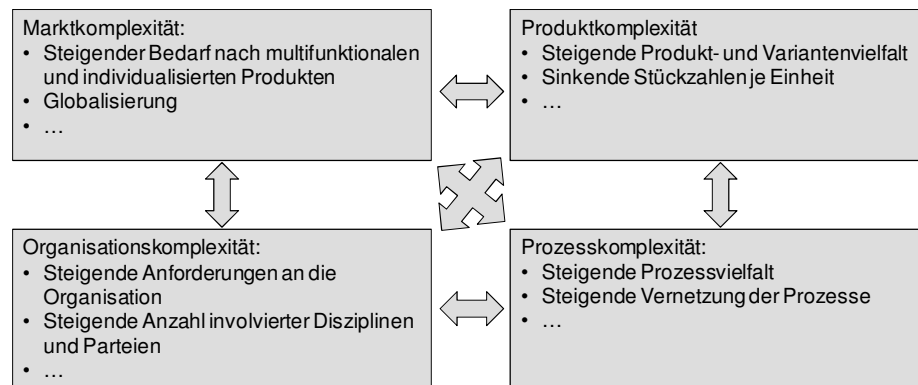


Abbildung 3-12: Aspekte der Komplexität in der Produktentwicklung [Maurer 2007, S.3]

3.2.7 Strukturierung des sozio-technischen Systems der Produktentwicklung

Da Systeme nach den aufgezeigten Definitionen in den verschiedensten Bereichen von der Natur bis zur Wirtschaft identifiziert werden können, existieren unzählige Klassifizierungen. Die vorliegende Arbeit setzt sich mit dem sozio-technischen System der Produktentwicklung auseinander. Dieses kann nach EHRENSPIEL ET AL. [1996] in die Teilsysteme Zielsystem, Handlungssystem, Prozesssystem und Objektsystem aufgeteilt werden. Die Teilsysteme lassen sich nach KLEEDÖRFER [1999, S.57 F] wie folgt zusammenfassend charakterisieren:

- **Zielsystem:** Unterteilung in Projekt-, Produkt-, Prozessziele. Ziele erscheinen als Modelle des Produktes oder Prozesses in den anderen Teilsystemen. Die Ziele dienen dem Soll-Ist Vergleich während dem Projektfortschritt.
- **Objektsystem:** Zu erstellendes Produkt und seine Struktur. Elemente des Objektsystems werden über die Dauer der Produktentwicklung ausdetailliert.
- **Prozesssystem:** Ablauforganisation bestehend aus notwendigen Teilprozessen, Vorgängen und Ereignissen zur Zielerreichung.
- **Handlungssystem:** Aufbauorganisation der Produkterstellung. Neben der formalen Organisation bilden sich informale Strukturen auf Grund Persönlichkeit und Sozialverhalten der Mitarbeiter.

Die einzelnen Modelle können nicht getrennt voneinander gesehen werden, sondern stehen in vielfältigen Wechselwirkungen miteinander. So kann beispielweise durch eine neue gesetzliche Vorgabe die Integration einer zusätzlichen Komponente notwendig werden. Dies wiederum kann zusätzliche Entwicklungsprozesse nach sich ziehen und hat somit

Auswirkungen auf das Prozesssystem. Dieses Beispiel zeigt auch, dass das System Produktentwicklung bei Betrachtung als Black-Box äußeren Einflussgrößen ausgesetzt ist. Hierzu zählen neben dem Gesetzgeber insbesondere der Markt, Kunden, Lieferanten, Gesellschaft sowie die Umwelt. Der Output der Produktentwicklung wiederum bedient und beeinflusst insbesondere Kunden, Markt, Auftraggeber, Gesellschaft und Umwelt.

3.3 Vorgehensmodelle

3.3.1 Allgemeine Vorgehensmodelle der Produktentwicklung

LINCKE [1995, S.14] definiert den Produktentwicklungsprozess als „...die 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.“. Vorgehensmodelle bieten eine wichtige Hilfe diese Aktivitäten systematisch zu planen und zu gestalten.

Eingliederung verschiedener Vorgehensmodelle

Vorgehensmodelle lassen sich in Abhängigkeit ihres Zeithorizontes beziehungsweise Detaillierungsgrades der Makrologik oder Mikrologik zuordnen [DAENZER & HUBER 1999, 29FF]. Der Übergang zwischen den Bereichen Makrologik und Mikrologik ist nach LINDEMANN [2007] jedoch fließend. Vorgehensmodelle die den Produktentwicklungsprozess in Phasen einteilen sind der Makrologik zuzuordnen. Hingegen werden Vorgehensmodelle der Problemlösung eher der Mikrologik zugeschrieben [DAENZER & HUBER 1999]. Für die Strukturierung der Aktivitäten während der Problemlösung wirken Grundprinzipien unterstützend. Hierzu zählen insbesondere das „*Denken in Alternativen*“ sowie das Prinzip „*vom Ganzen zum Detail*“ [DAENZER & HUBER 1999].

Vorgehensmodelle für die Entwicklung und Konstruktion sind aus empirischer Konstruktionsforschung abgeleitet worden. Aus deskriptiven Beschreibungen entstehen somit präskriptive Modelle die erfolgreiche Vorgehensweisen auf abstrahiertem Niveau darstellen [LINDEMANN 2007, S. 36]. Zusätzlich unterscheiden sich Vorgehensmodelle laut LINDEMANN in Ihrer Zielsetzung sowie ihrer Allgemeingültigkeit.

Gliederung des Produktentwicklungsprozesses in Phasen

Die Entwicklung und Realisierung ist insbesondere bei komplexen Produkten ein umfangreiches Unterfangen. Daher ist die Gliederung dieses Prozesses in einzelne Phasen hilfreich. Folgende Grafik zeigt exemplarisch die Phasen nach VDI-Richtlinie 2221 sowie nach DAENZER & HUBER [1999]. Im Automobilbereich mündet die Einteilung in Phasen meistens in einem Referenzprozess (siehe Kapitel 4.3).

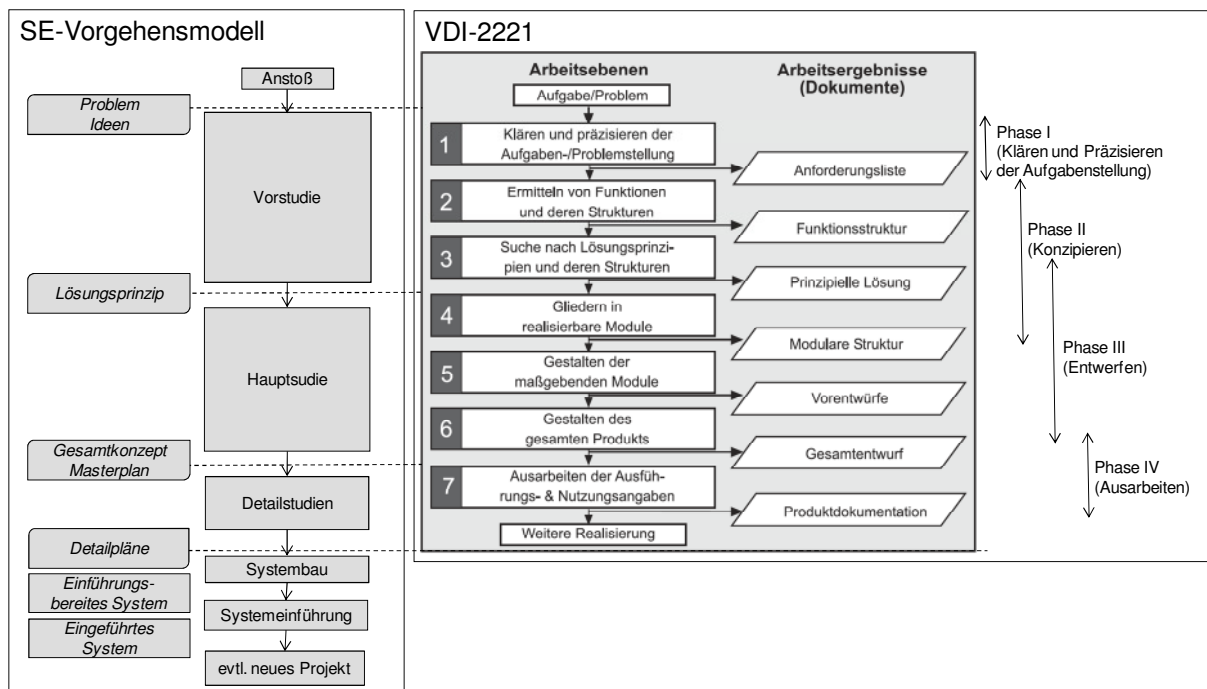


Abbildung 3-13: Das SE-Vorgehensmodell [DAENZER & HUBER 1999] und das Vorgehensmodell nach VDI-2221

Das SE-Vorgehensmodell nach DAENZER & HUBER teilt den Produktentwicklungsprozess in die Phasen Vorstudie, Hauptstudie, Detailstudien, Systembau und Systemeinführung. Zwischen den einzelnen Phasen sind Abbruchbedingungen vorgesehen. Zusätzlich gibt das Modell Entwicklungsergebnisse vor, die zum Abschluss einer Phase vorliegen sollten. So wird zum Beispiel die Vorstudie durch das Vorliegen des Lösungsprinzips abgeschlossen. Vergleicht man dieses Vorgehensmodell mit dem Vorgehen nach VDI-2221 so fällt der stärkere Produktentwicklungsbezug von VDI-2221 auf. Ausgehend von der Aufgabe oder dem Vorliegen eines Problems werden sieben Arbeitsebenen zur schrittweisen Konkretisierung des Produktes vorgegeben. Dabei werden die sich überlappenden Phasen „Klären und Präzisieren“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ durchlaufen. Den einzelnen Arbeitsebenen sind ebenfalls zentrale Ergebnisse zugeordnet. Wie bereits angesprochen, ist der Übergang zwischen Modellen der Makrologik und der Mikrologik fließend. Daher kann das Vorgehensmodell nach VDI-2221 auch als ein Modell zur Problemlösungen aufgefasst werden.

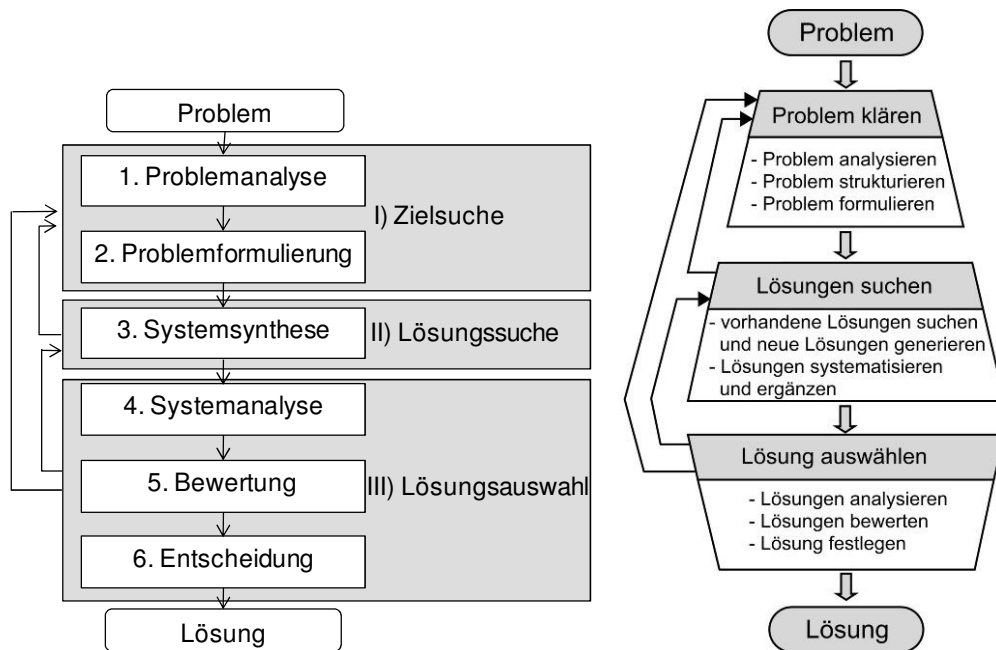
Vorgehensmodelle zur Problemlösung

DAENZER & HUBER schlagen für eine erfolgreiche Problemlösung auf der Mikrologik einen Problemlösungszyklus vor. Dieser Problemlösungszyklus soll bei jeder Art von Problem in jeder beliebigen Phase anwendbar sein. Daher beruht der Problemlösungszyklus nach DAENZER & HUBER [1999, S.47FF] auf den Grundschritten:

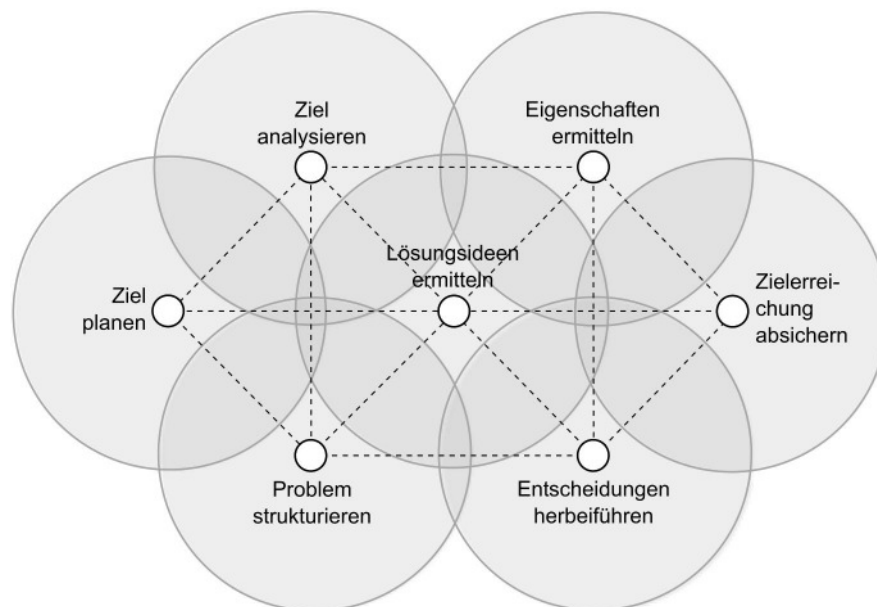
- Zielsuche
- Lösungssuche
- Lösungsauswahl

Die Zielsuche untergliedern DAENZER & HUBER in die Problemanalyse und die Problemformulierung. Den nächsten Schritt im sequentiellen Ablauf stellt die Systemsynthese dar. In diesem Schritt werden Lösungen gesucht die anschließend mit den Schritten Systemanalyse, Bewertung und Entscheidung in einer Lösungsauswahl münden. Die angesprochenen Grundschritte finden sich auch in weiteren Vorgehensmodellen zur Problemlösung wieder. Der Vorgehenszyklus zur Systemsynthese nach EHRENSPIEL [2007] baut auf dem Problemlösungszyklus des Systemsengineering auf. Durch die sargartige Darstellung wird die Zunahme der Informationen zur Erzeugung einer Lösungsvielfalt sowie die anschließende Einschränkung der Lösungsvielfalt zum Ausdruck gebracht. Beide Vorgehensmodelle sehen zwar Iterationen und Rücksprünge vor jedoch vermittelt die graphische Darstellung einen stark sequentiellen Ablauf. Das Münchner Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN [2007] setzt diesem Mangel eine netzwerkartige Darstellung entgegen. Hierdurch wird dem Anwender des Vorgehensmodells die Möglichkeit gegeben, das Vorgehen situationspezifisch anzupassen. Im Einzelnen weist das Münchner Vorgehensmodell folgende Elemente auf [LINDEMANN 2007, S.46]:

- Ziel planen
- Ziel analysieren
- Problem strukturieren
- Lösungsideen ermitteln
- Eigenschaften ermitteln
- Entscheidungen herbeiführen
- Zielerreichung absichern



Problemlösungszyklus [DAENZER&HUBER 1999] Vorgehenszyklus zur Systemsynthese [EHRENSPIEL 2007]



Münchener Vorgehensmodell [LINDEMANN 2007]

Abbildung 3-14: Vorgehensmodelle zur Problemlösung

Neben den dargestellten Vorgehensmodellen zur Problemlösungen existieren weitere, die sich jedoch meist auch auf die genannten Grundschritte beziehen. Wird der Betrachtungshorizont

ausgehend von phasenbezogenen Vorgehensmodellen der Makrologik hin zu Modellen der Problemlösung weiter reduziert, gelangt man zu Modellen der Elementarebene.

Modelle der Elementarebene

Modelle der Elementarebene werden durch Menschen meist intuitiv bei der Lösung von Problemen angewandt. Psychologen haben sich intensiv mit dem Verhalten bei der Problemlösung beschäftigt. Hieraus entstanden verschiedene Modelle, die die beobachteten Vorgehensweisen auf einem abstrahierten Niveau darstellen. Ein bekanntes Beispiel für ein solches Modell ist das TOTE-Vorgehen nach MILLER ET AL. [1973]: Test Operate Test Exit.

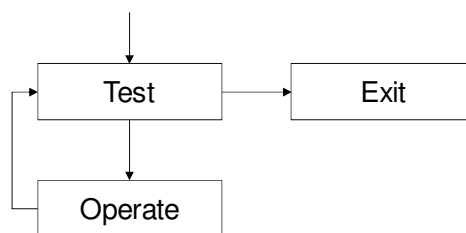


Abbildung 3-15: TOTE-Modell der Elementarebene [MILLER ET AL. 1973]

Nach jedem Handlungsschritt wird somit geprüft, ob das generierte Ergebnis den Zielvorstellungen entspricht. Falls dies der Fall ist, wird die Schleife Testen und Handeln abgebrochen (Exit). Modelle, die auf dem TOTE-Schema aufbauen, sind der VVR-Zyklus (Vergleich-Veränderung-Rückmeldung) nach HACKER [1998], der PDCA-Zyklus (Plan, Do, Check, Act) nach DEMING [1989] oder das DPS-Modell (Discursive Problem Solving) nach WULF [2002]. Diese Modelle erweitern den Grundgedanken des TOTE-Modells durch eine stärkere Betonung der Reflektion des eigenen Vorgehens sowie der Zielorientierung.

3.3.2 Vorgehensmodelle der Softwareentwicklung

Da sich Softwareprodukte zu teils sehr komplexen Systemen entwickelt haben, ist die Unterstützung des Softwareentwicklungsprozesses durch geeignete Methoden und Vorgehensmodelle ein erfolgskritischer Baustein geworden. Im Folgenden soll ein Überblick über weitverbreitete Vorgehensmodelle der Softwareentwicklung gegeben werden.

Wasserfallmodell

Eines der ersten und somit bekanntesten Vorgehensmodelle ist das Wasserfallmodell nach BOEHM [1976]. Der Entwicklungsprozess wird in mehrere Schritte unterteilt, die sequentiell abgearbeitet werden. Im Falle der unzureichenden Ergebnisqualität eines Entwicklungsschrittes sieht das Modell Rücksprünge in die jeweils darüber liegende Stufe vor.

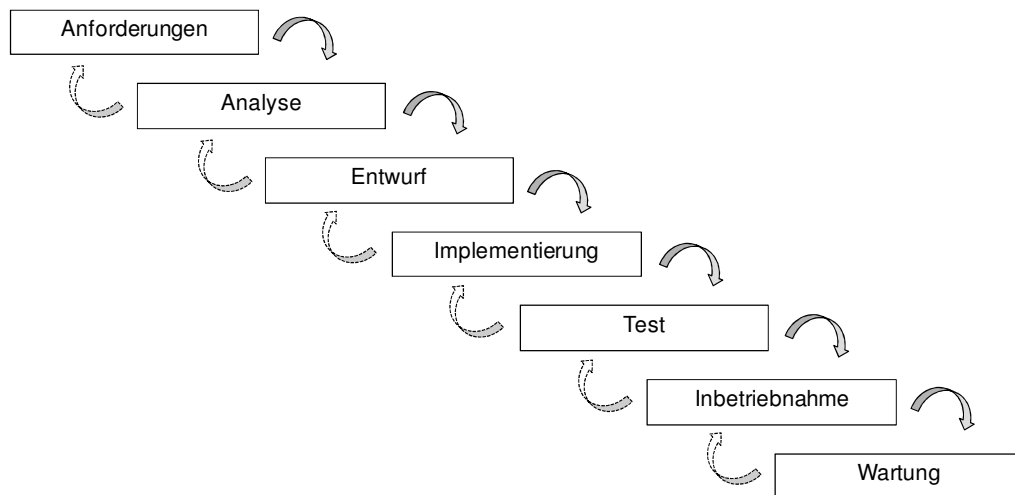


Abbildung 3-16: Wasserfallmodell nach [BOEHM 1981]

Zunächst sieht das Wasserfallmodell die Klärung der Anforderungen vor. Im Rahmen dieses Schrittes wird eine Durchführbarkeitsstudie angestoßen. Zusätzlich werden Kosten-Nutzen Abschätzungen vorgenommen. Die Aktivitäten der Anforderungsklä rung münden in der Erstellung eines Pflichtenheftes. In diesem Dokument werden der Funktionsumfang, die Benutzeroberflächen und das Leistungsverhalten festgehalten. Zusätzlich wird ein Terminplan erstellt. Im Entwurfsschritt wird die innere Struktur des Programms definiert. Hierunter ist die Architektur der Software zu verstehen. Die einzelnen Komponenten werden spezifiziert. Ergebnis ist die Softwarespezifikation. Im Anschluss erfolgt die Umsetzung der Komponenten in Form der Implementierung. Zunächst werden die Komponenten für sich getestet und erst danach im Rahmen eines Integrationstests Schritt für Schritt zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Das Gesamtsystem wird zusätzlich durch den Systemtest abgesichert. Dabei werden insbesondere die Anforderungen und Ziele des Pflichtenheftes überprüft. In Abhängigkeit der Softwaregröße und Komplexität können die abschließenden Schritte Inbetriebnahme und Wartung sehr umfangreich ausfallen.

Das Wasserfallmodell zergliedert den Entwicklungsprozess in handhabbarere und überprüfbare Phasen. Jedoch ist das Modell stark sequentiell aufgebaut. Iterative Rücksprünge über mehrere Phasen hinweg sind nicht vorgesehen. Daher entspricht dieses Modell meist nicht den wahren Gegebenheiten in Softwareentwicklungsprojekten [FLOYD & OBERQUELLE 2001].

Spiralmodell:

Zur Behebung der Nachteile des Wasserfallmodells hat BOEHM das Spiralmodell entwickelt [BOEHM 1988].

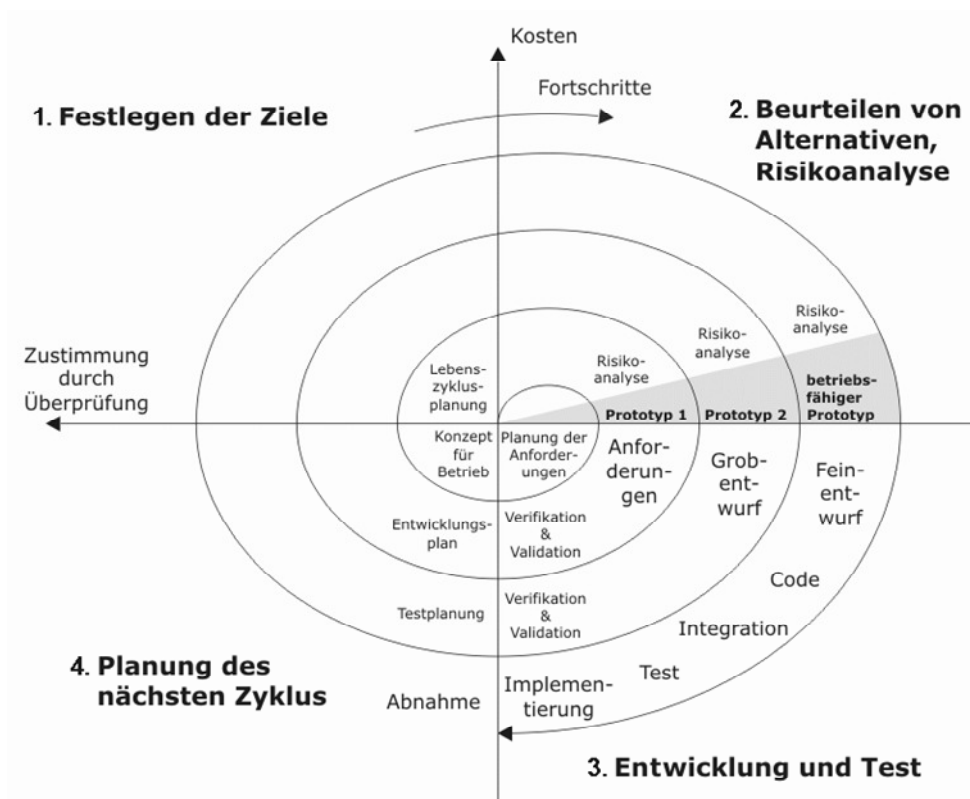


Abbildung 3-17: Spiralmodell nach [BOEHM 1988]

Das Vorgehen ist durch ein spiralförmiges mehrmaliges Durchlaufen der Bereiche: Zielfestlegung, Beurteilung, Entwicklung und Test sowie Planung des nächsten Zyklus gekennzeichnet. Im Laufe des Entwicklungsprozesses entstehen dabei mehrere Prototypen. Der letzte Prototyp entspricht dem fertigen Produkt. Das Spiralmodell ist stark risikoorientiert und sieht daher die iterative Bewertung und Bearbeitung von Risiken vor. Im Gegensatz zum Wasserfallmodell sind auch Rücksprünge in vorhergehende Phasen vorgesehen. Insbesondere für die Entwicklung von Softwaresystemen, deren Anforderungen nicht vollständig zu Projektbeginn festgelegt werden können, eignet sich das Spiralmodell. Das Spiralmodell setzt jedoch eine Kultur der ehrlichen Qualitätsbewertung von Entwicklungsständen voraus. Kosten- und Zeitabschätzungen in frühen Phasen sind schwierig. Zusätzlich ist der Aufwand für das Projektmanagement in großen und innovativen Projekten extrem. [BALZERT 1998, S.133]

V-Modell:

Aufbauend auf dem Wasserfallmodell wurde das V-Modell entwickelt. Durch die V-förmige Anordnung werden Qualitätssicherung, Verifikation und Validation integriert. Die einzelnen Teststufen überprüfen jeweils die auf der gegenüberliegenden Seite liegenden Schritte. So dient beispielsweise der Modultest der Verifikation der Modulimplementierung oder der

Integrationstest der Verifikation des Feinentwurfs. Die Validierung erfolgt im Abnahmetest. In diesem Schritt wird überprüft, ob das entwickelte Produkt die Anforderungen erfüllt.

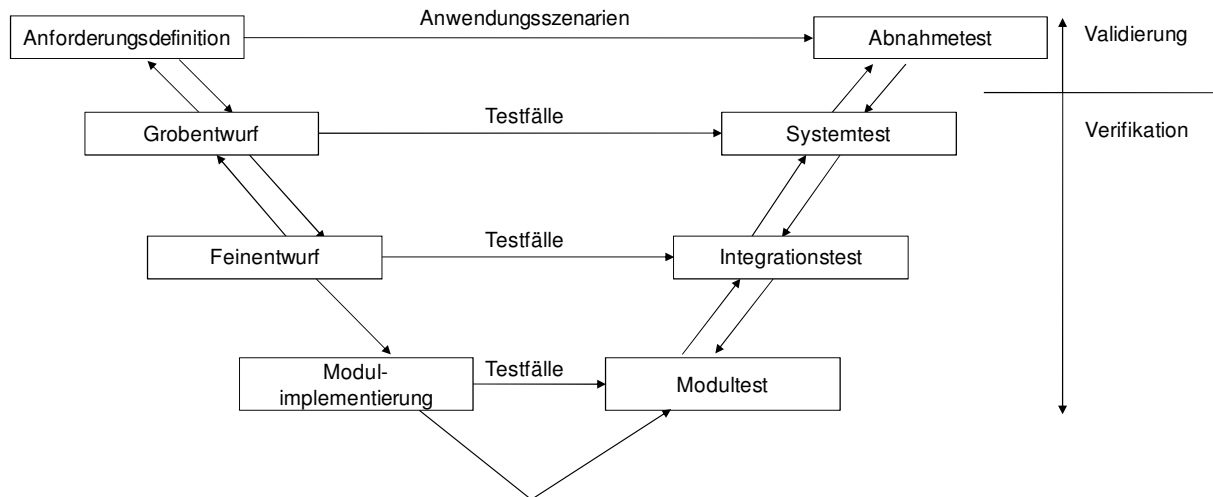


Abbildung 3-18: V-Modell [BALZERT 1998, S. 101]

Die Weiterentwicklung des V-Modells ist das V-Modell 97 [V-MODELL 97 1997]. Das V-Modell 97 stellt einen Entwicklungsstandard für IT-Systeme des Bundes dar. Innerhalb des Modells werden Aktivitäten und Produkte des Entwicklungsprozesses vorgegeben. Zusätzlich werden Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten und Produkten dargestellt [BALZERT 1998, S.102]. Das V-Modell 97 behandelt mehrere Bereiche und ist daher in vier Teilmodelle untergliedert: Systemerstellung, Qualitätssicherung, Konfigurationsmanagement und Projektmanagement. Die jüngste Weiterentwicklung des V-Modells stellt das V-Modell XT dar. XT steht für extreme tailoring und repräsentiert die Anpassbarkeit des Modells an die jeweiligen Rahmenbedingungen. Hauptmotivationsgründe für die Weiterentwicklung des V-Modells 97 waren [V-MODELL XT 2005]: „Schaffung der Möglichkeit zur Anpassung an verschiedene Projekte und Organisationen, Anwendbarkeit im Projekt, Skalierbarkeit auf Unterschiedliche Projektgrößen sowie Änder- und Erweiterbarkeit des V-Modells selbst. Berücksichtigung des neuesten Stands der Technologie und Anpassung an aktuelle Vorschriften und Normen. Erweiterung des Anwendungsbereiches auf die Betrachtung des gesamten Systemlebenszyklus bereits während der Entwicklung. Einführung eines organisations-spezifischen Verbesserungsprozesses für Vorgehensmodelle.“

Prototypen Modell:

Weder das Wasserfallmodell noch das V-Modell berücksichtigen die Integration des zukünftigen Nutzers in ausreichender Form. Hierdurch können erhebliche Entwicklungsrisiken entstehen. Der zukünftige Nutzer kennt zu Beginn des Entwicklungsprojektes meist noch nicht alle Anforderungen, die er selbst an die Software stellt. Die Verankerung von Prototypen im Entwicklungsprozess als Mittel zur Senkung des Entwicklungsrisikos sowie zur stärkeren Integration des Kunden sieht daher das

Prototypenmodell vor [BALZERT 1998, S.114FF]. Typische Prototypen sind der Demonstrationsprototyp zur Auftragsakquisition, Prototypen im engeren Sinne zur Analyse des Anwendungsbereichs, Labormuster zur Klärung konstruktionsspezifischer Fragen und Pilotsysteme, die einer seriennahen Vorversion des Produktes entsprechen.

Evolutionäres / inkrementelles Modell:

Ein Modell das mit dem Prototypen Modell gut kombiniert werden kann, ist das evolutionäre oder inkrementelle Modell. Zunächst werden in Zusammenarbeit mit dem Kunden die Kernanforderungen definiert und festgehalten. Anschließend werden diese Kernanforderungen genutzt, um eine sogenannte Nullversion des Produktes zu entwickeln. Dieses Kernsystem wird dem Nutzer übergeben. Im Laufe der Verwendung des Nullsystems werden neue und erweiterte Anforderungen ersichtlich. Diese stellen die Basis für die Erstellung einer erweiterten Version. Das beschriebene Vorgehen birgt jedoch die Gefahr, dass zunächst nicht erkannte Kernanforderungen im Nachhinein zu schwerwiegenden Änderungsbedarfen führen.

Weitere Vorgehensmodelle der Softwareentwicklung, die sich in der Literatur finden, sind das objektorientierte Modell, das nebenläufige Modell [BALZERT 1998, S.120 FF] sowie Extreme Programming [BENDER 2005]. Da die Bedeutung dieser Modelle für die vorliegende Arbeit nicht groß ist, wird an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen.

3.3.3 Vorgehensmodelle der Elektrik-/Elektronikentwicklung

In der Elektrik-/ Elektronik existieren bis dato weit weniger Vorgehensmodelle als für den klassischen Maschinenbau oder die Softwaretechnik. Eines der wichtigsten Modelle ist das Y-Diagramm nach WALKER für die Entwicklung von Digitalelektronik [WALKER 1985].

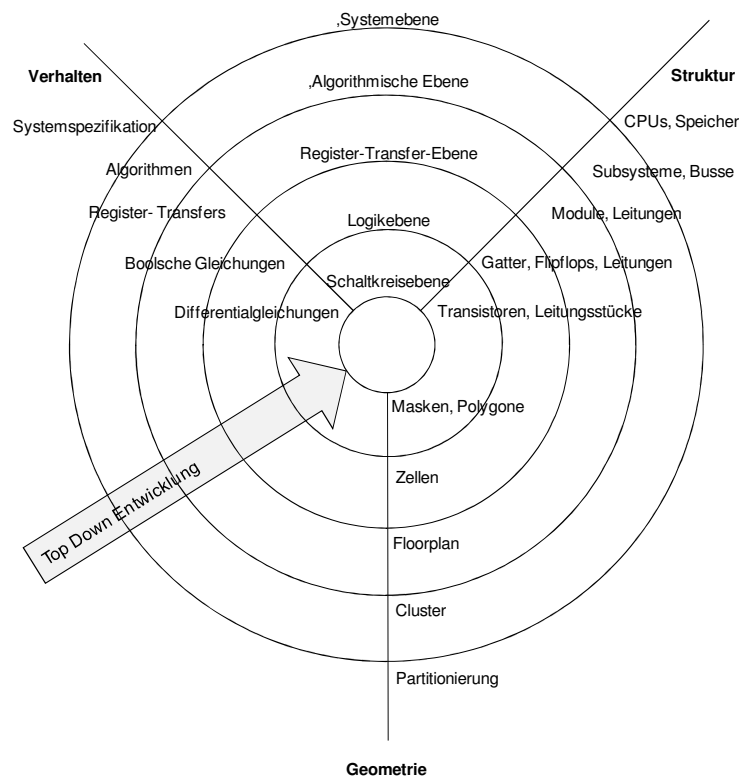


Abbildung 3-19: Y-Diagramm nach [WALKER 1985]

Das Y-Diagramm berücksichtigt drei verschiedene Sichten der Entwicklung von Elektronikprodukten. Dies sind im Einzelnen: die verhaltensorientierte, die strukturelle sowie die geometrische Sicht. Durch diese drei Aspekte wird das in Abbildung 3-19 dargestellte Y gebildet. Die Entwicklung des Systems erfolgt in fünf Abstraktionsstufen, die in Form von konzentrischen Kreisen repräsentiert sind. Außen stellt die Systemebene den höchsten Abstraktionsgrad dar. Der Konkretisierungsgrad nimmt über alle Sichten nach innen hin zu. Den höchsten Konkretisierungsgrad bildet die Schaltkreisebene. Das Y-Diagramm sieht Zustands- und Ergebnisprüfungen vor dem Übergang zur nächsten Ebene vor. Bei mangelnder Ergebnisqualität kann in eine höhere Abstraktionsstufe zurückgesprungen werden.

Das Y-Modell fordert in der Systemebene zunächst die Systemspezifikation sowie die Festlegung der Basisblöcke. Dies sind beispielsweise Speicher, Prozessoren oder Schnittstellen. Zusätzlich erfolgt in dieser Ebene eine Partitionierung des Systems. In der Algorithmischen Ebene werden aus Verhaltenssicht Darstellungen mit Variablen und Operatoren zur Darstellung verwendet. Gegenstand der strukturellen Sicht sind die Festlegung der Subsysteme und deren signalbezogene Vernetzung. Aus geometrischer Sicht werden Cluster gebildet. Auf die algorithmische Ebene folgt anschließend die Registerebene. Dort werden aus verhaltensorientierter Sicht Beschreibungen der Registertransfers sowie eine

detailliertere Beschreibung des zeitlichen Verhaltens vorgenommen. Gegenstand der strukturellen Ebene sind dann Register, Codierer und Multiplexer. Geometrisch erfolgt dabei eine weitere Verfeinerung der Einteilung in Form eines Floorplans.

Die weitere Konkretisierung erfolgt über die Logikebene. In Form von boolescher Gleichungen wird in dieser das Verhalten beschrieben. Darüber hinaus wird der Elektronikentwurf durch Zusammenschaltung der Grundelemente verfeinert. Gatter und Flip-Flops kommen dabei verstärkt zum Einsatz.

In der letzten Ebene, der Schaltkreisebene, wird das System aus verhaltensorientierter Sicht durch Differenzialgleichungen, aus geometrischer Sicht durch Polygonzüge und aus struktureller Sicht durch die Vernetzung von elektrischen Bauelementen (Transistoren, Kapazitäten, Widerstände) beschrieben und festgelegt.

3.3.4 Vorgehensmodelle für die Mechatronik

Den domänenspezifischen Vorgehensmodellen folgen in den nächsten Teilkapiteln Ansätze zur Planung und Strukturierung der Entwicklung mechatronischer Systeme.

Phasenmodell mechatronischer Systeme

KALLENBACH ET AL. [1997] stellen ein Phasenmodell für die Entwicklung mechatronischer Systeme vor. Mechatronische Systeme zeichnen sich durch zahlreiche Wechselwirkungen heterogener Teilsysteme aus. Dies führt zu einer erhöhten Komplexität. Daher fordern KALLENBACH ET AL. die „Anwendung von Methoden der funktions- und gestaltorientierten Systemanalyse: Partitionierung, hierarchische und modulare Strukturierung und die Anwendung verschiedener Integrationsstrategien“ [KALLENBACH ET AL. 1997, S.225]. KALLENBACH ET AL. betonen, dass auf Grund der zahlreichen Wechselwirkungen das Gesamtoptimum nicht durch losgelöste Optimierung der Teilsysteme zu erreichen ist. Sie fordern daher eine stärkere Beachtung des Gesamtzusammenhangs. Abbildung 3-20 zeigt das Phasenmodell für die Entwicklung mechatronischer Systeme nach KALLENBACH ET AL. Der Entwurfsprozess wird top-down iterativ durchlaufen. Durch eine Präzisierung der Aufgabenstellung sowie der funktionalen Anforderungen soll der Lösungsraum eingegrenzt und die Zahl der notwendigen Analyse-Synthese Schleifen reduziert werden. Im darauf folgenden Schritt werden „optimale“ hierarchische Funktionsstrukturen entwickelt. Hierzu werden Gesamtfunktionen in Teilfunktionen aufgegliedert (vgl. Kapitel 3.2.3). Zwischen den einzelnen Teilfunktionen treten jedoch typischer Weise zahlreiche Wechselwirkungen auf. KALLENBACH ET AL. unterscheiden dabei zwischen funktionell notwendigen und funktional störenden (parasitären) Wechselwirkungen. Für die Findung einer optimalen Funktionsstruktur sollten daher Modellierungstechniken zur Anwendung kommen, die eine Berücksichtigung von parasitären Wechselwirkungen ermöglicht. Ein Beispiel hierfür ist das relationsorientierte Funktionsmodell nach TRIZ, wie es auch in dieser Arbeit eingesetzt wird (siehe Kapitel 7.2) [vgl. TERNINKO 1998]. Im Schritt der Gestaltung werden für die einzelnen Teilfunktionen Gestaltstrukturen (Lösungen) gesucht. Dabei müssen technologische Aspekte im Sinne von Verträglichkeiten berücksichtigt werden. Analog zu den Funktionen

unterscheiden KALLENBACH ET AL. zwischen „Gestalt zur Erfüllung einer Teilfunktion“ und „Gestalt zur Kompensation einer Störfunktion“.

Im Rahmen der Gestaltung werden insbesondere die Geometrie, Material und Zustandseigenschaften festgelegt. Ziel der Festlegungen muss es sein, die vorgegebenen Anforderungen einzuhalten. KALLENBACH ET AL. betonen in diesem Zusammenhang, dass eine Ausrichtung auf die Erreichung des globalen Optimums, und nicht auf die Erreichung der lokalen Optima erforderlich ist. Auf Grund der komplexen Wechselwirkungen und geometrischen Restriktionen ist dies jedoch keine triviale Aufgabe, die daher einer systematischen Vorgehensweise bedarf. In der Gestaltungsphase unterscheiden KALLENBACH ET AL. zwischen dem Konstruktionsprinzip der Funktionsintegration und der Funktionstrennung. Da mechatronische Systeme durch die Einbettung von Regelmechanismen parasitäre Wechselwirkungen zwischen Systemelementen eliminieren können, bietet die Funktionsintegration in Form von multifunktionalen Bauelementen nach Ansicht von KALLENBACH ET AL. erhebliche Erfolgspotentiale.

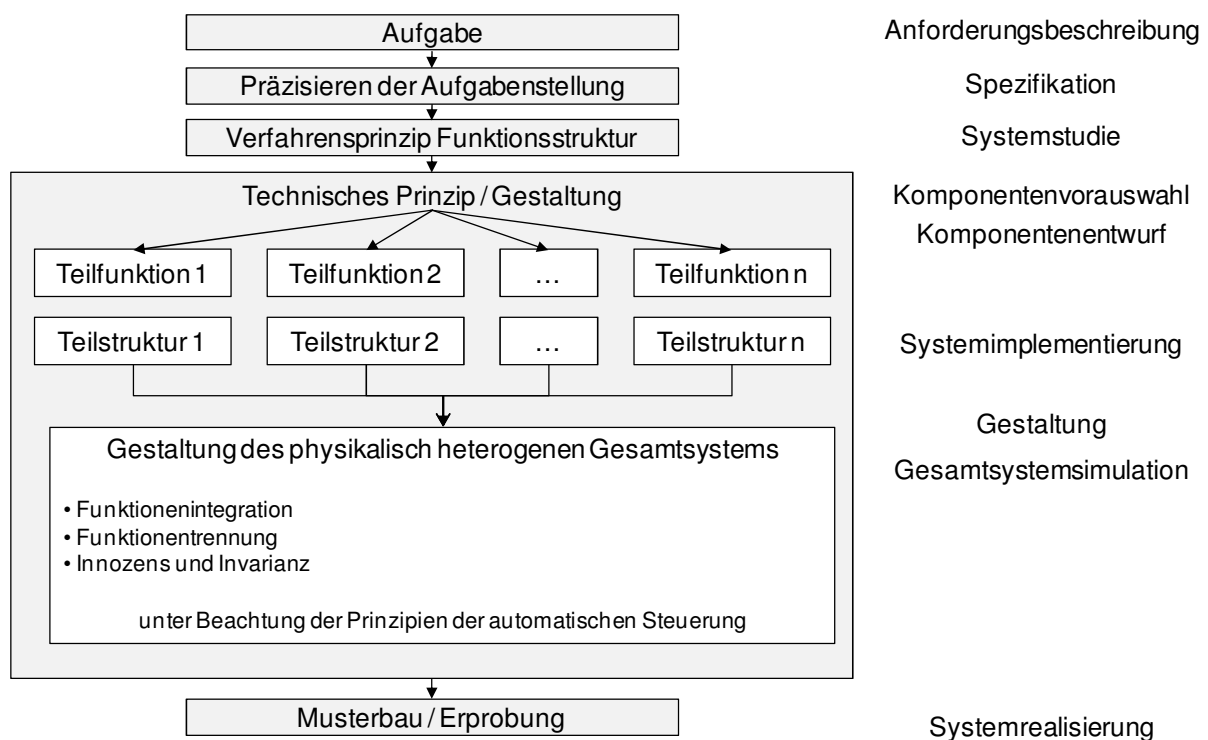


Abbildung 3-20: Phasenmodell mechatronischer Systeme [KALLENBACH ET AL. 1997]

Integrierter Entwicklungsprozess für mechatronische Produkte

SCHÖN [2000] beschreibt eine integrative Vorgehensweise für die Entwicklung mechatronischer Systeme unter Einbezug spezifischer Abläufe der Disziplinen

Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik. Der Entwicklungsprozess wird analog zu VDI-2221 in die vier Phasen: Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten gegliedert.

In der Planungsphase erfolgt die Klärung und Definition der Anforderungen. Das zentrale Ergebnisdokument stellt das Pflichtenheft dar. Für die folgende Konzeptphase betont SCHÖN die Wichtigkeit der Vermeidung von domänenspezifischen Beschreibungsweisen. Den Teilfunktionen werden daher generalisierte Effekte zugeordnet. Die verallgemeinerten Effekte sehen die Kombination von physikalischen Effekten und Softwarekomponenten vor [vgl. SCHWEIGER & SCHÖN 1997]. Durch die Kombination von Teilfunktionen mit den generalisierten Effekten werden Wirkprinzipien gebildet. Die Wirkstruktur stellt darauf aufbauend die Vernetzung der Wirkprinzipien dar.

Wurde ein physikalischer Effekt gewählt, so erfolgt die weitere Detaillierung analog zu VDI 2221 von der Prinziplösung über die Feingestaltung zur Ausarbeitung und somit zu den Fertigungsinformationen. Das gleiche Vorgehen wird für Elemente der Leistungselektronik angewandt. Im Falle von Softwarekomponenten kann eine Entscheidung erfolgen, ob die Realisierung als Software oder als elektronische Schaltung vorgenommen wird. Die Entscheidung kann jedoch bei Anwendung geeigneter Beschreibungssprachen sowie der Anwendung des Hardware-Software Codesigns [TEICH 1997] bis in die Phase der Ausarbeitung verlagert werden. Für die Entwicklung der Integrierten Schaltkreise gibt SCHÖN das Vorgehen des Y-Diagramms vor (siehe Kapitel 3.3.3).

Als Beispiel für die gegenseitige Beeinflussung des technischen Entwurfs und der Entwicklung integrierter Schaltkreise nennt SCHÖN die Abhängigkeit von Prozessorleistung und geometrischen Randbedingungen. So erfordert eine höhere Prozessorleistung eventuell einen Kühler, der wiederum mehr Platz benötigt und somit die technische Komponente beeinflusst. Eine Unterstützung zur Handhabung und Bewältigung solcher Herausforderungen wird durch SCHÖN nicht diskutiert. Die Integration der einzelnen Teilentwürfe zu einem funktionierenden Gesamtsystem wird ebenfalls nicht ausreichend dargestellt.

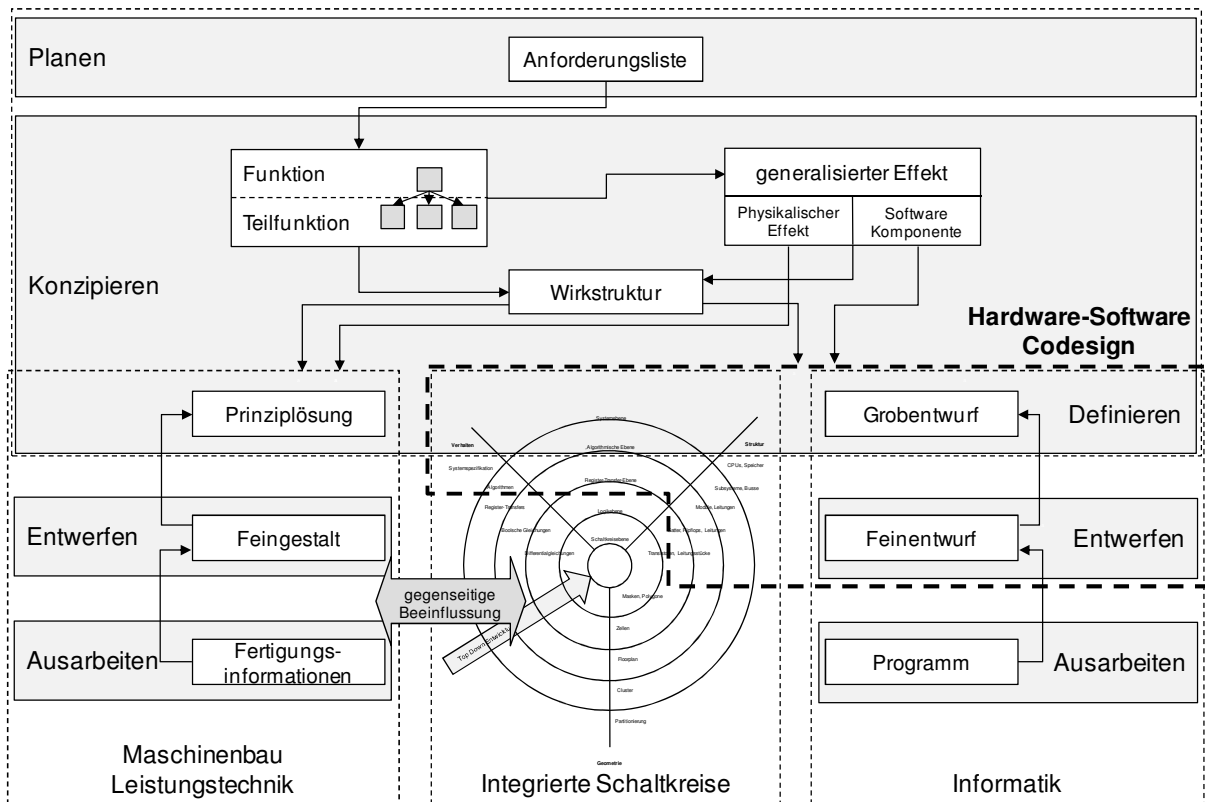


Abbildung 3-21: Integrierter Entwicklungsprozess für mechatronische Produkte [SCHÖN 2000, S.68]

Vorgehensmodell nach VDI / VDE-Richtlinie 2422

Für die Entwicklung von mechanischen Geräten mit Steuerung durch die Mikroelektronik bietet VDI-Richtlinie 2422 ein Vorgehensmodell an. Zentrales Element, der darin betrachteten technischen Systeme, stellt das Steuergerät dar. Die einzelnen Entwicklungsphasen des Modells gleichen VDI-Richtlinie 2221.

Auf Basis der Anforderungsklä rung wird im ersten Schritt die Aufgabenstellung ausgearbeitet. Hierzu werden Benutzeroberfläche, Prozessoberfläche und Kommunikationsschnittstelle verbal beschrieben. Im nächsten Schritt, dem Gerätekonzept, werden Zustandsgraphen für die Benutzeroberfläche erstellt. Diese werden später in eine Zustandsmatrix, die die Überprüfung der Vollständigkeit erlaubt, überführt. Darauf aufbauend kann die Benutzerschnittstelle beschrieben werden. Der technische Prozess wird in Teilprozesse zerlegt. Anschließend werden den einzelnen Teilprozessen Aktoren, Sensoren und Steuerungskonzepte zugeordnet. Die Kommunikationsschnittstelle wird in Abhängigkeit des technischen Prozesses beschrieben. Für den weiteren Entwicklungsprozess erfolgt an dieser Stelle eine Beschreibung der Teilaufgaben für die weitere disziplinspezifische Ausarbeitung. Zusätzlich wird das erarbeitete Gesamtkonzept auf Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz hin überprüft. Der disziplinübergreifenden Konzeptphase folgen der disziplinspezifische Entwurf und die

disziplinspezifische Ausarbeitung für Software, Schaltung und Elektromechanik. Anschließend werden die disziplinspezifischen Entwicklungen in der Erprobung zusammengeführt. In dieser Phase kommen Labormuster, Funktionsmuster und Prototypen zum Einsatz. Werden die Anforderungen ausreichend erfüllt, kann die Fertigungsfreigabe erfolgen.

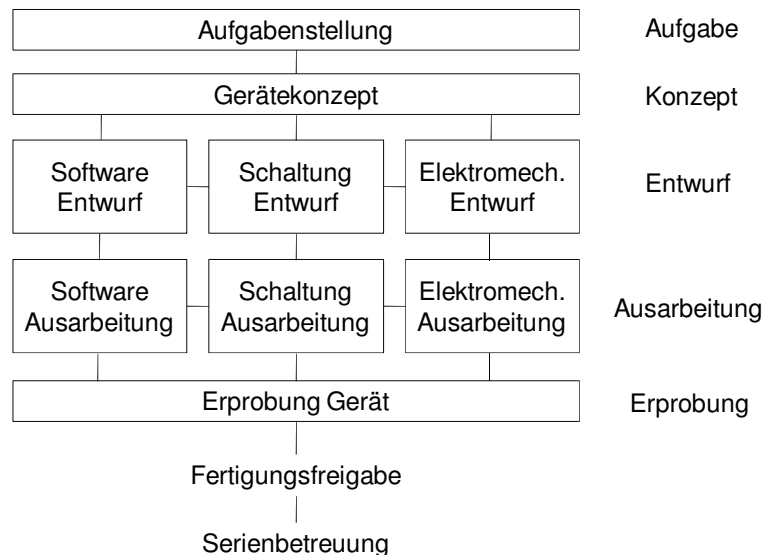


Abbildung 3-22: Vorgehensplan für die Entwicklung von Geräten mit Steuerung durch die Mikroelektronik [VDI 1994, S.15]

V-Modell nach VDI-2206

Das V-Modell nach VDI-2206 baut auf VDI-2422 „Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik“ sowie dem V-Modell der Softwareentwicklung auf. Ziel des V-Modells ist es, ein integriertes Vorgehen für die Entwicklung mechatronischer Systeme zur Verfügung zu stellen. Das V-Modell soll jedoch nicht dazu dienen, bewährte domänenspezifische Vorgehensmodelle abzulösen. Das V-Modell besteht aus drei Hauptbereichen: Vorgehensmodell, Modellbasierter Systementwurf, Werkzeuge und Organisation. Das Vorgehensmodell unterteilt sich in einen Makrozyklus und einen Mikrozyklus. Der Mikrozyklus bewegt sich auf der Ebene einzelner Teilaufgaben. Der Makrozyklus strukturiert den gesamten Produktentwicklungsprozess in drei Hauptphasen.

Zunächst werden die Anforderungen an das Gesamtsystem festgelegt. Anschließend folgt der disziplinübergreifende Systementwurf als erste Phase. Das beschriebene Vorgehen in dieser Phase gleicht stark dem zuvor vorgestellten Phasenmodell nach KALLENBACH ET AL. [1997]. So wird zunächst eine lösungsneutrale Beschreibung von Funktionen und deren Zerlegung in Teilfunktionen vorgesehen. Den einzelnen Teilfunktionen werden Wirkprinzipien zugeordnet, um anschließend eine Wirkstruktur erstellen zu können (vergleiche VDI 2222). Das zentrale Ergebnis des Systementwurfs ist ein disziplinübergreifendes Lösungskonzept. Die

Wichtigkeit dieser Phase für den Erfolg des Produktentwicklungsprozesses wird stark betont. Auch in der vorliegenden Arbeit wird auf die systematische Zerlegung von Funktionen in Teilfunktionen und die Zuordnung von Lösungselementen sowie die Erstellung von Wirkstrukturen zurückgegriffen, um zentrale Abhängigkeiten des mechatronischen Systems abzuleiten (siehe Kapitel 7.3).

In VDI 2222 wird das disziplinübergreifende Lösungskonzept anschließend im domänenspezifischen Entwurf durch die einzelnen Disziplinen ausdetailliert. Es erfolgt also eine Aufgliederung des Entwicklungsprozesses in drei parallele Entwicklungsstränge. Für die Planung des jeweiligen Vorgehens können bewährte Vorgehensmodelle, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben wurden, herangezogen werden.

Im Rahmen der Systemintegration werden in mehreren Schritten die einzelnen disziplinspezifischen Entwicklungen zusammengeführt und in Bezug auf die Anforderungen abgesichert. Die Richtlinie nennt als Integrationsarten die „*Integration verteilter Komponenten*“, die „*Modulare Integration*“ und die „*Räumliche Integration*“. Den Abschluss dieser Phase stellt das fertige Produkt dar.

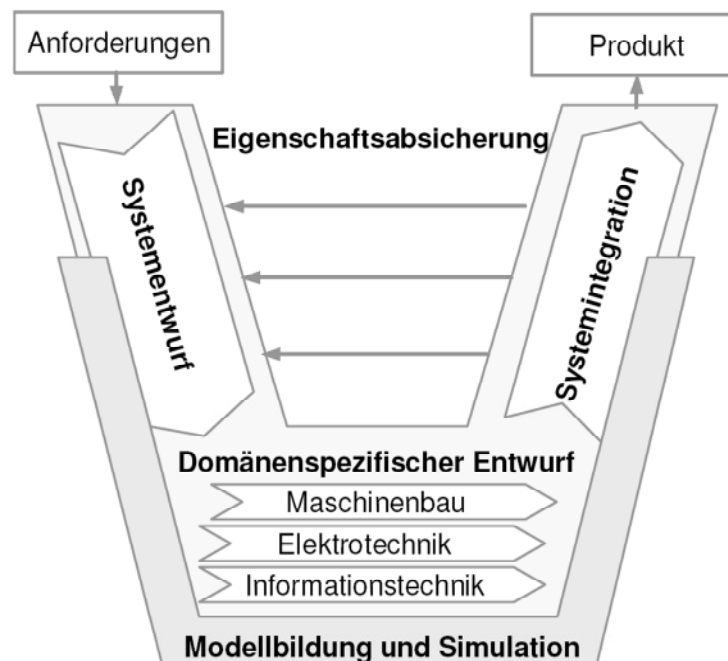


Abbildung 3-23: V-Modell nach VDI-2206

3.3.5 Fazit

Die vorgestellten Vorgehensmodelle bieten je nach Branche sinnvolle Strukturierungen auf der Makroebene. In der Automobilbranche ist mittlerweile das V-Modell der Mechatronik weit verbreitet. Jedoch wird für die konkreten Probleme der interdisziplinären

Zusammenarbeit, wie beispielsweise die Zusammenführung der einzelnen disziplinspezifischen Entwicklungsstränge, zu wenig Unterstützung durch das V-Modell oder die anderen vorgestellten Modelle geliefert. Eine ungenügende methodische Unterstützung zur Beherrschung der gestiegenen Komplexität mechatronischer Systeme bemängelt auch MÖHRINGER [2005]. Daher fordert MÖHRINGER eine durchgängige Entwicklungsmethodik für die Mechatronik sowie eine stärkere Unterstützung der Mikrologik. Die Kapitel 7 bis 8.3.7 beschäftigen sich aus dieser Motivation heraus mit Ansätzen, die verstärkt auf die Mikrologik fokussiert sind.

3.4 Strategien

Im Folgenden werden die Strategien „Integrierte Produktentwicklung“, „Simultaneous Engineering“ und „Projektmanagement“ vorgestellt. Diese Strategien haben einen starken Einfluss auf den Entwicklungsprozess im Automobilbau sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit und sind daher auch für die vorliegende Arbeit von erheblicher Relevanz.

3.4.1 Integrierte Produktentwicklung

Motiviert ist die integrierte Produktentwicklung durch die Herausforderungen der stark arbeitsteiligen Produkterstellung. Die Herausforderungen resultieren aus den sich in den letzten 100 Jahren stark veränderten Bedingungen der Güterproduktion. Hierzu zählen insbesondere [EHRENSPIEL 2007, S.182 F], [MAGRAB 1997, S.5]:

- Kurze Produktlebenszeiten sowie kurze Innovationszeiten
- Variantenflut durch Kundenindividualisierung
- Zunahme der Produktkomplexität
- Erhöhter Wettbewerb und hierdurch bedingter Wandel zum Käufermarkt

Ziel der integrierten Produktentwicklung ist es, eine integrierte Produkterstellungsmethodik zur Verfügung zu stellen, die sowohl Entwicklung und Konstruktion als auch die Bereiche Produktion, Vertrieb, Materialwirtschaft und Controlling umfasst [EHRENSPIEL 2007, S.3], [ANDREASEN & HEIN 1987]. Dies beinhaltet:

- Denkmethoden zur Lösung von Problemen
- Organisationsmethoden zur Optimierung zwischenmenschlicher Prozesse
- Methoden zur unmittelbaren Produktverbesserung (meist Konstruktionsmethodiken)

LINDEMANN & KLEEDÖRFER [1997] führen das Zusammenwirken der Teilsysteme: Projektmanagement, Mensch, Aufbauorganisation, Ablauforganisation sowie Methoden und Werkzeuge als Elemente der integrierten Produktentwicklung auf. Nach EHRENSPIEL sollen geistige Mauern im Unternehmen durch eine integrierte Denkweise gebrochen werden. Hierdurch werden Zeit-, Kosten- und Qualitätsvorteile erzielt [EHRENSPIEL 2007, S. 186].

Das Prinzip der integrierten Denkweise zur Überwindung des Abteilungsdenkens ist, bezogen auf die Mechatronik, in folgender Abbildung dargestellt.

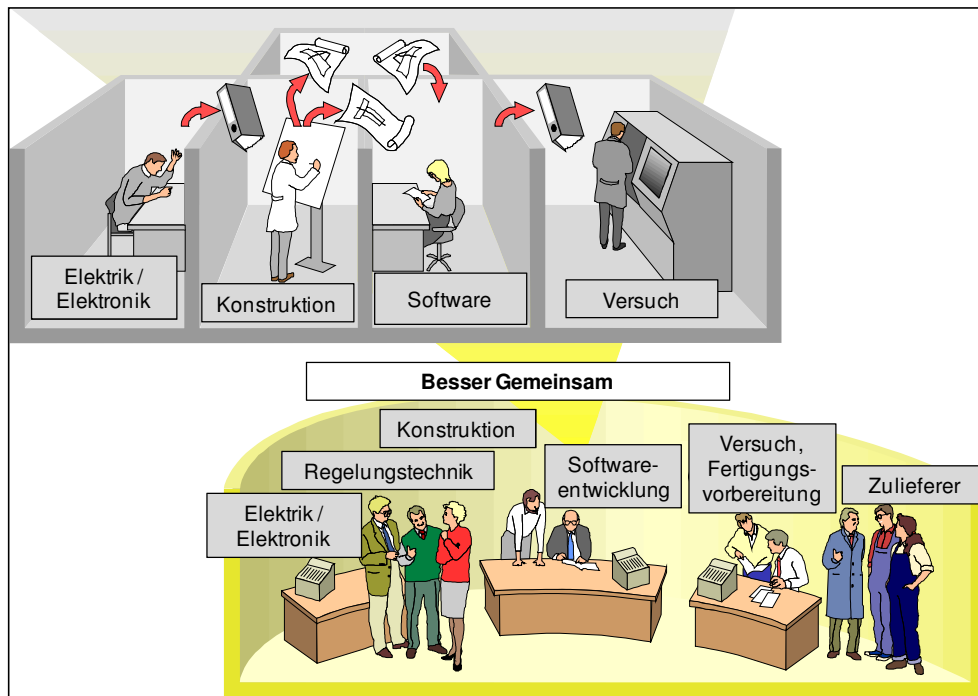


Abbildung 3-24: Geistige Mauern nach [EHRENSPIEL 2007]bezogen auf die Mechatronik

Zur Erreichung der Integration von Menschen, ihren Aktivitäten und Ergebnissen sowie zur Verfolgung von Zeit-, Kosten-, und Qualitätszielen sind laut EHRENSPIEL integrierende Vorgehensweisen notwendig. Hierzu zählen:

- Simultaneous Engineering und Concurrent Engineering
- Qualitätsmanagement
- Target-Costing

Auf den Bereich des Simultaneous Engineerings wird folgend gesondert eingegangen.

3.4.2 Simultaneous Engineering

Unter Simultaneous Engineering wird im Allgemeinen die Parallelisierung von Abläufen sowie die Bildung von interdisziplinären Teams zur Verkürzung von Produktentwicklungszeiten und zur Erhöhung der Qualität verstanden [EVERSHEIM & SCHUH 2005, S. 8]. Das Prinzip des Simultaneous Engineering formuliert ALLEN als “designing the product and the process to manufacture at the same time” [ALLEN 1990].

Zur Erreichung der Zielgrößen Zeit, Qualität und Kosten forciert das Simultaneous Engineering zielgerichtete und interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit. Dies bezieht

sich auf die Bereiche Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung und umschließt den gesamten Produktlebenslauf. Zentrale Voraussetzung hierfür ist ein straffes Projektmanagement. [EHRENSPIEL 2007, S. 218]

Folgende Abbildung stellt die wesentlichen Säulen des Simultaneous Engineering dar. Die dargestellten Erfolgsmerkmale werden von allen Autoren häufig zitierter Literatur des Simultaneous Engineerings mit unterschiedlicher Einzelbetonung aufgeführt (u.a. [BULLINGER ET AL. 1995], [EVERSHEIM ET AL. 1995], [BERNDES & STANKE 1997], [EHRENSPIEL 2007], [KROTTMAIER 1995]).

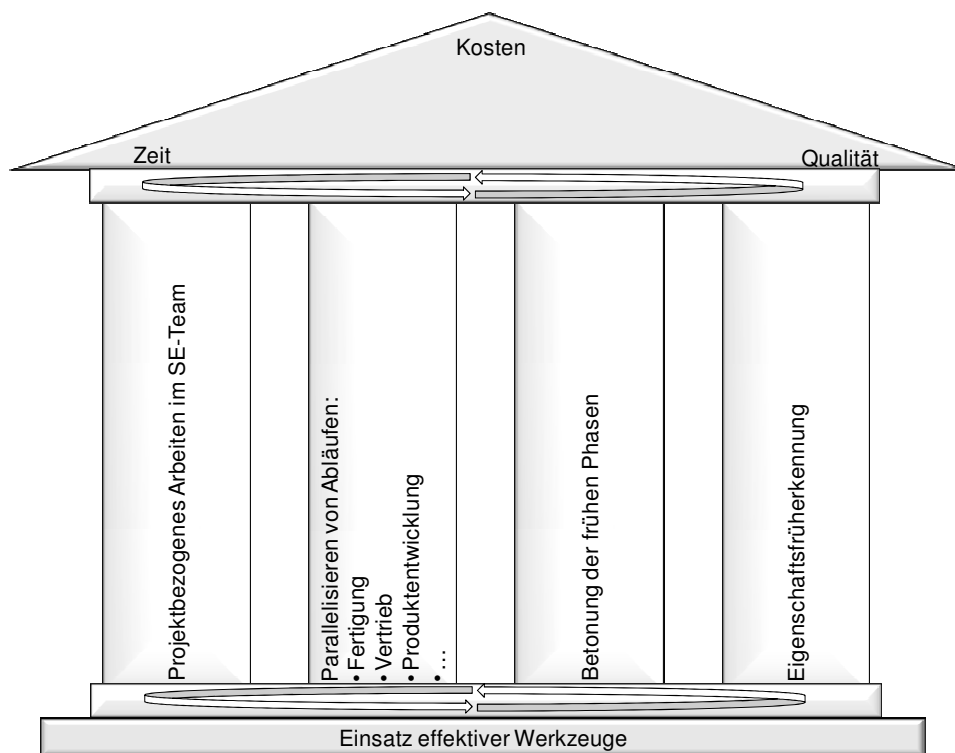


Abbildung 3-25: Tragende Erfolgsmerkmale des Simultaneous Engineering. Basierend auf [BERNDES & STANKE 1997], [EHRENSPIEL 2007, S.219], [EVERSHEIM ET AL.1995], [KROTTMAIER 1995].

Das interdisziplinäre Simultaneous Engineering Team (SE-Team) wird aus der in Abbildung 3-24 dargestellten Motivation projektbezogen gebildet. Ziel der Teamarbeit ist insbesondere die Verbesserung der interdisziplinären Kommunikation und hierdurch die Erhöhung des übergreifenden Problemverständnisses. Durch die intensive Kommunikation wird zusätzlich der Dokumentationsaufwand verringert. Aufgabe des SE-Teams ist es, auch den Kunden sowie die Zulieferer stärker in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Die interdisziplinäre Kommunikation ist neben dem straffen Projektmanagement Grundvoraussetzung für die Parallelisierung der Abläufe. Charakteristisch für den Ansatz des Simultaneous Engineerings ist die Betonung der frühen Phase, durch die ebenfalls eine gesamtprojektbezogene Einsparung von Zeit und Kosten sowie eine Verbesserung der Produktqualität erzielt werden

soll. Die Forcierung von Eigenschaftsfrüherkennungsmaßnahmen wie Simulation oder Rapid Prototyping bewirkt zusätzlich eine Reduzierung später und kostenintensiver Änderungen. Alle aufgeführten Säulen des Simultaneous Engineering bedürfen der Unterstützung durch effektive Werkzeuge um weiteres Optimierungspotential zu ermöglichen.

Synonym zu Simultaneous Engineering wird häufig die Bezeichnung Concurrent Engineering verwendet. Die Verwendung des Begriffs Concurrent Engineering findet sich vornehmlich im amerikanischen Raum. Simultaneous Engineering ist dagegen eher in Europa die gebräuchliche Bezeichnung [GIERHARDT 2001, S. 69]. BULLINGER [1995] kombiniert beide Bezeichnungen zu Concurrent Simultaneous Engineering. Auf die Grundlagen des Concurrent Engineering wird an dieser Stelle nicht genauer eingegangen, da die zentralen Ansätze denen des Simultaneous Engineering sehr ähnlich sind.

Ein Teilbaustein des Simultaneous Engineering ist, wie bereits erwähnt, ein erfolgreiches Projektmanagement. Die grundlegenden Inhalte und Begriffe des Projektmanagements werden in folgendem Kapitel behandelt.

3.4.3 Projektmanagement

„Projektmanagement ist nach DIN 69901 die Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Abwicklung eines Projektes“ [DIN-69901]. DAENZER & HUBER fassen Projektmanagement in Bezug auf Innovationsprozesse als „Überbegriff für alle planenden, überwachenden, koordinierenden und steuernden Maßnahmen“ auf [DAENZER & HUBER 1999, S. 240]. Auf Grund einer steigenden Anzahl an Projekten unter immer strengeren Rahmenbedingungen ist die Bedeutung des Projektmanagements in den letzten Jahren stark angestiegen. OLFERT führt folgende Gründe für die steigende Anzahl an Projekten auf [OLFERT 2004, S.13]:

- Erhöhung der Komplexität in Wirtschaft und Technik
- Trend zur Globalisierung
- Hohe Dynamik der Wirtschaft
- Trend zu dynamischem, prozessorientierten Denken

Aufgrund der enormen Bedeutung des Projektmanagements in der industriellen Welt existieren internationale Institutionen, die sich dem Projektmanagement verschrieben haben. Dies sind allen voran das amerikanische „*Project Management Institute*“ sowie die „*International Project Management Association*“.

Ein Projekt zeichnet sich in der Regel durch folgende Charakteristika aus [DAENZER & HUBER, S.240], [EHRENSPIEL 2007, S.211], [OLFERT 2004, S.13 F]:

- Einzigartig
- Zeitlich befristet
- Risikobehaftet

- Ziel- und Ergebnisorientiert
- Finanziell klar abgegrenzt
- Komplex und eigendynamisch
- Interdisziplinär bedingt durch den Umfang des Projektes
- Ressourcentechnisch begrenzt

Das Projektmanagement wird typischer Weise in die Projektorganisation sowie das Projektmanagement im engeren Sinne aufgeteilt. Die Projektorganisation befasst sich mit dem Projektdesign und der Projektplanung. Dem Projektmanagement im engeren Sinne werden die Projektvorbereitung, die Projektauslösung, die Projektdurchführung und der Projektabschluss zugeordnet. Die aufgezählten Aufgabenbereiche bilden die zentralen Vorgehenselemente bei einer Projektdurchführung. Deren weitere Untergliederung ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 3-2: Zentrale Vorgehenselemente einer Projektdurchführung nach [OLFERT 2004, S. 22 ff]

Projektvorbereitung:	Projektdesign:	Projektplanung:	Projektauslösung:	Projektdurchführung:	Projektabschluss:
Problemerkennung	Projektstart	Aufgabenplanung	Projektbeurteilung	Projektleitung inkl. Projektkontrolle	Abschlusskontrolle
Projekteinbindung	Projekteinbindung	Personalplanung	Projektentscheidung	Projektarbeit	Projektnachweise
Problemanalyse	Projektbetreuung	Terminplanung	Projektstart		Projektauflösung
Problem-entscheidung	Projektgruppe	Sachmittelplanung			
Machbarkeits-analyse	Lösungsprozess (Grobstrukturierung)	Kostenplanung			
Risikoanalyse		Dokumentations-planung			
Projektplanungs-entscheidung		Qualitätsplanung			
		Berichtsplanung			



Auf die Elemente Lösungsprozess (Grobstrukturierung) sowie die Projektplanung soll auf Grund ihrer Bedeutung für diese Arbeit an dieser Stelle genauer eingegangen werden. Der Lösungsprozess ist zu verstehen als die Grobstrukturierung des gesamten Produktentwicklungsprozesses in Phasen. Hierfür können Vorgehensmodelle, wie sie in Kapitel 3.3 vorgestellt wurden, als Planungshilfe herangezogen werden [OLFERT 2004, S. 76 ff]. Die einzelnen Phasen sind durch Meilensteine, die eine Überprüfung der Teilzielerreichung sowie die Entscheidung über den weiteren Projektfortschritt erlauben,

voneinander abgegrenzt. In Branchen wie der Automobilindustrie, in denen sich der grundsätzliche Charakter der bearbeiteten Projekte stark gleicht, wird der Produktentwicklungsprozess typischer Weise in einem übergeordneten Referenzprozess grob festgelegt. Ein typischer Referenzprozess des Automobilbaus wird in Kapitel 4.3 vorgestellt. KRAUSE ET AL. [2006, S. 91] nennen folgende Gründe für die Einführung eines Referenzprozesses:

- Einteilung von Entwicklungsprojekten in Phasen für die Definition von Zielen und Resultaten,
- Systematisches Qualitäts- und Kostenmanagement,
- Gemeinsame Referenz für eine klare Aufgabenverteilung von Projekten,
- Unterstützung des Managements beim Controlling des Entwicklungsprojekts,
- Unterstützung des Projektleiters in der Planung und Durchführung des Projekts,
- Definition und Koordination von Schnittstellen in der Projektdurchführung,
- Aufbau von Methodenkompetenz und Vermittlung von Vorgehensweisen

Meist wird der Produktentwicklungsprozess in eine projektunabhängige Vorphase, eine Konzeptphase, eine Serienentwicklungsphase, den Serienanlauf (Start of Production) und eine Weiterentwicklungsphase eingeteilt [KRAUSE ET AL. 2006, S.92]. Diese Phasen finden sich auch bei EHRENSPIEL, der die Produktentwicklung in fünf Bereiche einteilt: Planung, Aufgabe, Konzept, Entwurf, Ausarbeitung und Fertigung. Die Phase der Entwicklung und Konstruktion bezeichnet EHRENSPIEL als den „Kern der Produkterstellung“ [EHRENSPIEL 2007, S.1].

Ausgehend von der Grobeinteilung des Produktentwicklungsprozesses in Phasen kann eine weitere Detaillierung erfolgen. Die Projektplanung legt hierfür die zur (Teil-) Zielerreichung notwendigen Aufgaben fest. Notwendige Vorgänge und die Vorgangsreihenfolgen werden festgelegt. Basierend auf dem Netzplan kann durch Zuordnung von Zeitdauern eine Vorwärts- und Rückwärtsterminierung erfolgen. Jedoch ist hierfür eine enge und iterative Abstimmung mit der Personalplanung erfolgen. Zentrale Darstellungsformen und Planungsmethoden sind Balkendiagramme und Netzpläne. Wichtige Ergebnisse dieser Planungsaktivitäten sind Projekttermine, Meilensteine (Meilensteinplanung), Pufferzeiten und kritische Pfade (Pfade ohne Pufferzeiten). Neben der Termin- und Kapazitätsplanung müssen Sachmittelpäne, Kostenpläne, Berichtspläne und Qualitätspläne erstellt werden.

Langfristig erfolgreiches Projektmanagement zeichnet sich durch eine feste Verankerung im Unternehmen aus. In Bezug auf die Organisation ist hierzu die Definition klarer Rollen, Kompetenzen und Verantwortlichkeiten erforderlich. Typische Formen der Integration von Projekten in die Aufbauorganisation sind die „*Reine Projektorganisation*“, die „*Stabsprojektorganisation*“, die „*Matrix-Projektorganisation*“, die „*Linien-Projektorganisation*“. Jedoch kann ohne eine geeignete Qualifizierung der Mitarbeiter und ohne Unterstützung durch geeignete Methoden und Software kein effizientes Projektmanagement entstehen.

3.4.4 Fazit

Die vorgestellten Ansätze der Integrierten Produktentwicklung, des Simultaneous Engineerings sowie des Projektmanagements sind elementare Bestandteile eines wettbewerbsfähigen Automobilherstellers geworden. Doch trotz der enormen Fortschritte die diese Strategien gebracht haben, bestehen häufig noch erhebliche Potentiale die Zusammenarbeit der einzelnen Disziplinen zu verbessern und so die Effizienz des Produktentwicklungsprozesses zu steigern. Häufig gehen die Ansätze der einzelnen Strategien in diesen Punkten nicht weit genug, so dass die in Kapitel 3.4.2 angesprochene Unterstützung auf der Mikroebene fehlt. Darüber hinaus ist trotz der Bildung von SE-Teams immer noch ein sehr starkes Disziplindenken erkennbar. So mangelt es den einzelnen Disziplinen der Mechatronik meist an einem ausgeprägten interdisziplinären Systemverständnis. Wie in Kapitel 5.2.5 aufgezeigt werden wird, verstärken disziplinspezifische Projektpläne diesen Umstand. Eine stärkere Integration der einzelnen Disziplinen fordern daher unter anderem HERFELD [2007] und REICHART [2005]. Diesen Herausforderungen wird in der vorliegenden Arbeit durch die Entwicklung eines systemverständnisfördernden Visualisierungstools (Kapitel 7 und 8) sowie durch die Bildung eines funktionsorientierten Integrationsmodells (Kapitel 9) begegnet.

4 Grundlagen mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Verankerung der Mechatronik in heutigen Fahrzeugsystemen. Darüber hinaus wird der Produktentwicklungsprozess im Automobilbau mit seinen typischen Phasen und zentralen Inhalten vorgestellt. In diesem Rahmen wird insbesondere auf die unterschiedlichen Absicherungsaktivitäten von Teilsystemtests bis zu Gesamtfahrzeugtests eingegangen.

4.1 Innovationsmotor Mechatronik

Der Großteil an Innovationen im Automobilbau der vergangenen Jahre kann der Mechatronik (bzw. der Elektronik) zugeschrieben werden. Experten nennen Innovationsanteile von bis zu 90% [DAIS 2004, GROMER 2004]. Damit verbunden ist ein Anstieg des Wertanteils elektrischer und elektronischer Komponenten auf 20 bis 30% [BRAESS & SEIFERT 2005, S. 597], [BROSE 2008], [VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE 2005]. Die Mechatronik hält in allen Bereichen des Automobils Einzug. GROMER [2004] geht daher von einer weiteren Verdoppelung der Elektronik in den nächsten zehn Jahren aus. Dabei werden Innovationen meist zunächst in Premiumsegmenten eingeführt und später sukzessive in allen Sparten übernommen. ISERMANN führt die in Tabelle 4-1 dargestellte Entwicklung mechatronischer Systeme im Automobil auf. Im Vergleich zu anderen Einsatzgebieten mechatronischer Systeme bezeichnet ISERMANN die mechatronischen Komponenten im Automobil „als besonders weit entwickelt“ [ISERMANN 2008, S.588F].

Tabelle 4-1: Mechatronik im Automobil [ISERMANN 2008, S.589]

Sensoren	Mechatronik Systeme	Aktoren
Raddrehzahl	Antiblockiersystem (ABS, 1979)	Hydraulikpumpe
Pedalweg	Antischlupfregelung (ASR, 1986)	Druckspeicher
Gierratensensor	Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP, 1995)	Magnet-Schaltventile
Querbearbeitung	Bremsassistent (BA, 1996)	Elektronische Drosselklappe
Lenkwinkel	Electrical Power Steering (EPS 1996)	Elektro-pneumatische Bremskraftverstärker
Federweg	Elektronische Luftfedern (EAS, 1998)	Elektro-pneumatische Luftfedern
Distanz (Radar)	Adaptive Cruise Control (ACC, 1999)	Hydraulikpumpen mit Druckspeicher
Bremsdrücke	Active Body Control (ABC 1999)	Magnet-Proportionalventile
Radbeschleunigung	Elektrohydraulische Bremse (EHB 2001)	Elektro-hydraulische Stoßdämpfer
Lenkungs-Drehmoment	Continuous Damping Control (CDC, 2002)	Elektrischer Überlagerungswinkelsteller
Wankwinkel	Active Front Steering (AFS, 2003)	Elektro-hydraulische Stabilisatoren
	Dynamic Drive Control (DDC 2003)	Elektro-hydraulische Radaufhängungen
	Brake by wire, Steer by wire (?)	
	Anti-Collision Avoidance (?)	

Zukünftige Entwicklungen, die sich im Automobilbereich andeuten und teilweise schon umgesetzt werden, sind Hybride Systeme (Elektrifizierung des Antriebsstranges), „Steer by wire“, „Brake by wire“ und Antikollisionssysteme. BRAESS & SEIFFERT sehen bei einer Realisierung des „Drive by wire“ weitere sich direkt hieraus ergebende Innovationspotenziale. So führen sie als Beispiel die Möglichkeit einer völligen Neugestaltung des Fahrerplatzes durch die Integration eines Joysticks anstatt eines Lenkrades auf [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 668]. Diese Ansätze werden den Anteil mechatronischer Systeme im Auto weiter erhöhen.

Bedingt ist die Mechatronisierung des Autos insbesondere durch schärfere Emissions- und Sicherheitsgesetze sowie den hohen Wettbewerb. Auf den erhöhten Wettbewerb reagieren die Unternehmen zum einen mit einer erhöhten Diversifikation in Form eines breiteren Produktspektrums sowie mit der Implementierung innovativer Funktionen. Dies führt wiederum zu erheblichen Herausforderungen bezogen auf die dadurch entstehende Komplexität. Die Herausforderungen der Automobilindustrie werden detailliert in Kapitel 5 besprochen.

4.2 Struktur mechatronischer Systeme im Automobilbau

Die informationsverarbeitende Einheit wird in Automobilen überwiegend durch Steuergeräte realisiert. Steuergeräte bestehen aus einer Eingangsstufe, einem Mikrocontroller und einer Ausgangsstufe [SCHÄUFFELE & ZURAWKA 2004, S. 47]. Auf Grund der hohen Anzahl an mechatronischen Funktionen im Automobil steigt die Zahl der erforderlichen Steuergeräte im Automobil ebenfalls an. So zeigt BOSCH [2007] am Beispiel der Mercedes S-Klasse diese Entwicklung auf. Im Jahre 1991 waren 5 Systeme im Fahrzeug verbaut. 2005 waren dies bereits 55.

Zu Beginn der 90er Jahre konnten die Softwarefunktionen meist noch eindeutig einem Steuergerät sowie einem Fahrzeugsystem zugeordnet werden. Dies hat sich jedoch im Laufe der letzten Jahre geändert. So ermöglichen die leistungsfähigen Bus-Systeme eine stärkere Vernetzung der einzelnen Steuergeräte und somit die Realisierung übergeordneter Softwarefunktionen. Softwarefunktionen, die nicht mehr einem Steuergerät zugeordnet werden können, werden daher in Teilfunktionen zerlegt und dann auf die Steuergeräte verteilt [SCHÄUFFELE & ZURAWKA 2003, S.6F]. Beispiele für Anwendungen, die fahrzeugsystemübergreifend agieren, sind die Antischlupfregelung oder der Abstandregeltempomat (*Adaptive Cruise Control*) [BOSCH 2007, S.16F].

Die Vernetzung der Steuergeräte wird, wie bereits erwähnt, typischer Weise über Bus-Systeme realisiert. Die Netzwerktopologie sowie die Bus-Technik spielen dabei eine wesentliche Rolle. Grundlegende Topologien sind [BOSCH 2007, S.5FF]:

- Bustopologie (auch Linientopologie genannt)
- Sterntopologie
- Ringtopologie und
- Maschentopologie

Durch Kopplung dieser Grundtopologien lassen sich verschiedene Hybridtopologien generieren. Die einzelnen Teilnehmer, die an dem Netzwerk hängen, werden als Knoten bezeichnet. Wie die Knoten mit einander kommunizieren, hängt von der Netzwerkorganisation, vom Netzwerkprotokoll und den Steuerungsmechanismen ab. Für Details zu diesen Bereichen sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen ([ISO/IEC 1996], [BENDER & KATZ 1993], [RIGGERT 2003])

In aktuellen Automobilen kommen meist mehrere Bus-Systeme parallel zum Einsatz. Welches Bus-System verbaut wird, hängt maßgeblich von der benötigten Datenübertragungsrate, der benötigten Störsicherheit, der benötigten Echtzeitfähigkeit und der Anzahl der Netzknoten ab. So stellen Systeme des Antriebsstranges, wie zum Beispiel das Antiblockiersystem oder die Fahrdynamikregelung auf Grund ihrer Sicherheitsrelevanz harte Echtzeitanforderungen. Weniger kritisch ist dies bei Multimediaanwendungen. Folgende Tabelle zeigt die im KFZ-Bereich eingesetzten Bus-Systeme mit den wichtigsten Daten:

Tabelle 4-2: Bussysteme und ausgewählte technische Daten [BOSCH 2007, S.15]

	CAN-C High-Speed-CAN	CAN-B Low-Speed-CAN	LIN	TTP
Domäne	Antriebsstrang	Komfort	Komfort	sicherheitsrelevante Vernetzung
Anwendung	Vernetzung von Motormanagement, Getriebesteuerung und ABS/ESP	Vernetzung von Karosserie- und Komfortelektronik	kostengünstige Erweiterungen für den CAN-Bus für einfache Anwendungen im Bereich Komfortelektronik	vernetzung in sicherheitsrelevanten Umgebungen wie Bremsen, Lenkung
Datenübertragungsrate	10kbit/s bis 1Mbit/s	max. 125 kbit/s	max. 20 kbit/s	nicht spezifiziert
max. Knotenzahl	10	24	16	nicht spezifiziert

	MOST-Bus	Bluetooth	Flexray
Domäne	Multimedia und Infotainment	Multimedia und Infotainment	domänenübergreifender Einsatz
Anwendung	Übertragung von Steuer-, Audio- und Videodaten	Datenübertragung über geringe Distanzen, z.B. Integration des Mobiltelefons in das Infotainmentssystem	ein Netzwerksystem zum Einsatz in sicherheitsrelevanten und einfacheren Anwendungen
Datenübertragungsrate	max. 22,5 Mbit/s	max 3 Mbit/s (v2.0)	max 20 Mbit/s
max. Knotenzahl	64	8 aktiv (bis zu 256 passiv)	theoretisch bis zu 2048

Die Kopplung der verschiedenen Bus-Systemtypen erfolgt über sogenannte Gateways. Dies sind Einheiten, die zwischen den einzelnen Bus-Systemen übersetzen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass erst durch die Vernetzung der Steuergeräte die funktionale Revolution ermöglicht wurde [BRAESS & SEIFERT 2005, S. 596]. Für die Zukunft prophezeien BRAESS & SEIFERT jedoch wieder eine Abnahme der Steuergerätezahl. Dies ist bedingt durch die weiter steigende Leistungsfähigkeit von Mikrocontrollern. So werden in Zukunft verteilte Funktionen zentral auf einem Rechner ausgeführt. Durch die hiermit verbundene Möglichkeit

die Software unabhängig von der Mechanik, der Sensorik und Aktorik entwickeln zu können, kann die Software durch Zulieferer als eigenes Produkt angeboten werden.

4.3 Phasen der Fahrzeugentwicklung

In Kapitel 3.4.3 wurde bereits angesprochen, dass sich Projekte in der Fahrzeugindustrie in Bezug auf die Entwicklungsinhalte und grundsätzlichen Abläufe stark gleichen. Daher wird typischer Weise ein Referenzprozess festgelegt. Dieser dient der groben Strukturierung des Produktentwicklungsprozesses in einzelne Phasen und der Festlegung benötigter Entwicklungsergebnisse beim Übergang von einer Phase zur nächsten. Abbildung 4-1 zeigt den Produktentwicklungsprozess im Automobilbau nach GESSNER [2001] und stellt diesen den Phasen des V-Modells gegenüber. Die Ablauforganisation der Fahrzeugentwicklung ist stark durch das Simultaneous Engineering beziehungsweise Concurrent Engineering geprägt [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 732FF], [SAPUAN ET AL. 2006]. GESSNER stellt dies in Abbildung 4-1 deutlich durch die starke Parallelisierung der einzelnen Entwicklungsstränge dar (vgl. Kapitel 3.4.2).

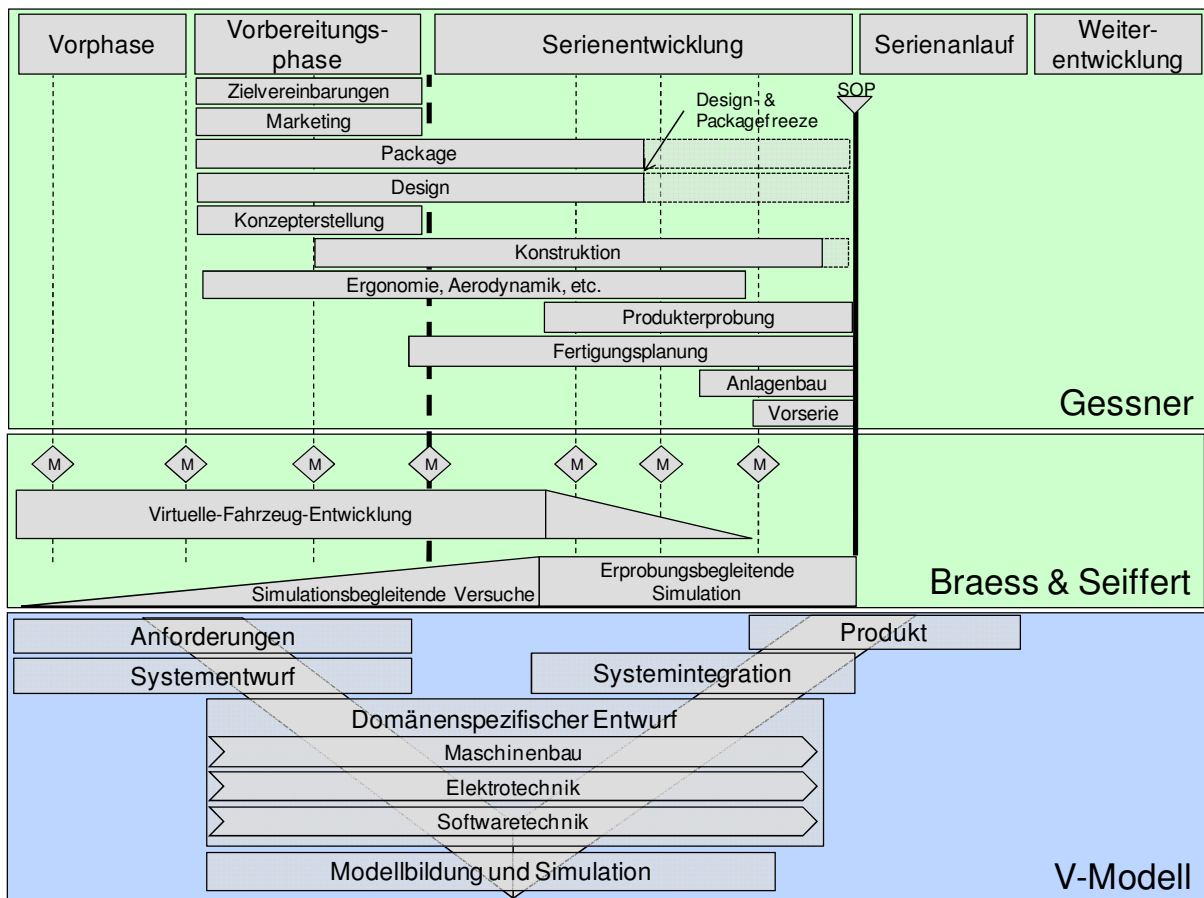


Abbildung 4-1: Produktentwicklungsprozess im Automobilbau [GESSNER 2001, S. 15], [BRAESS & SEIFFERT 2005, S.748], [VDI 2004].

Auf die einzelnen Phasen der Fahrzeugentwicklung sowie deren Vernetzung wird folgend genauer eingegangen. Zur Orientierung dient dabei Abbildung 4-1.

4.3.1 Projektunabhängige Vorphase

In der projektunabhängigen Vorphase werden strategische Ziele und Anforderungen definiert. Darüberhinaus ist zentraler Bestandteil der projektunabhängigen Vorphase die Generierung von Innovationen auf Werkstoffebene, Komponentenebene, Systemebene und Fahrzeugkonzeptebene. Designtrendbestimmungen sind ebenfalls ein wichtiges Element der Vorphase [GESSNER 2001, S.14.], [GRABNER & NOTHAFT 2005, S.23]. Die einzelnen Innovationen müssen in Bezug auf ihr Marktpotential hin bewertet werden. Ziel ist es, bei Anlauf der Serienentwicklung auf eine Reihe von erfolgversprechenden Innovationen zurückgreifen zu können, um sich im Wettbewerb behaupten zu können. Im Vergleich zu den projektabhängigen Phasen kann die Vorphase als ein kontinuierlicher Prozess angesehen werden. Den hierdurch erzielten zeitlichen Vorteil im Vergleich zu einem sequentiellen Ablauf von Forschung und projektbezogener Entwicklung stellen BRAESS & SEIFFERT wie folgt dar.

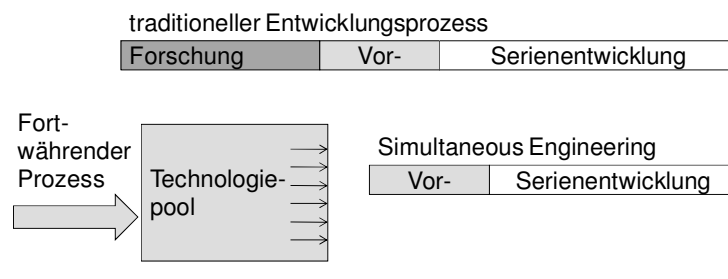


Abbildung 4-2: Entwicklungsprozesse im Vergleich [BRAESS & SEIFFERT 2005, S.734]

4.3.2 Projektbezogene frühe Entwicklungsphase

Der Serienentwicklung geht typischer Weise eine Vorbereitungsphase voran. Diese wird auch als frühe Entwicklungsphase, Konzeptphase oder Vorentwicklung bezeichnet [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 744 ff]. ABENDROTH gibt im Jahre 2007 eine Zeitdauer von 28 Monaten für die Vorentwicklung an [ABENDROTH 2008]. In dieser Phase werden ausgehend von einer Produktvision Konzeptalternativen erarbeitet und anschließend bewertet. Zusammenfassend wird somit das Gesamtfahrzeugkonzept definiert. Dies beinhaltet die Festlegung zentraler Merkmale: Hierzu zählen insbesondere [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 744]:

- Hauptmaße
- Proportionen
- Crashperformance
- Fahrleistungen
- Gewicht

- Ausstattungsinhalte
- Wertanmutung
- Innovationen
- Herstellkosten

Die Entwicklung des Gesamtkonzeptes stellt meistens keine vollkommene Neuentwicklung dar. Vielmehr werden bewährte Komponenten übernommen, modifiziert und durch Innovationen ergänzt. Die Innovationen stellen dabei das Salz in der Suppe dar und sollen den Kaufanreiz des zu entwickelnden Produktes im hart umkämpften Markt steigern. Das Entwicklungsrisiko kann durch einen fortlaufenden Innovationsprozess, wie in Abbildung 4-2 gezeigt, stark reduziert werden.

Im Rahmen der frühen Phase wird ein erstes dreidimensionales Modell des Fahrzeugs generiert. Dies definiert die Positionen und Abmessungen aller wichtigen Komponenten [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 744]. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Festlegung des Package. GRABNER & NOTHAFT definieren das Package als Verwaltung der Gesamtgeometrie und Sicherstellung der Aktualität dieser Daten. Das Package administriert darüber hinaus Anforderung an Bauräume und kümmert sich um deren Harmonisierung [GRABNER & NOTHAFT 2005, S. 23]. Das Exterieur sowie das Interieur werden in der frühen Phase jedoch nur grob festgelegt. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass in Bezug auf diese verkaufsentscheidenden und stark kundenrelevanten Punkte möglichst lange auf neue Erkenntnisse und Trends reagiert werden kann [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 745]. Die endgültige Festlegung des Designs erfolgt als sogenanntes „*Design-Freeze*“ relativ spät in der Serienentwicklung.

Da die frühe Entwicklungsphase mit einer größeren Unsicherheit behaftet ist, jedoch die Aussagesicherheit in Bezug auf die angesprochenen Haupteigenschaften des Fahrzeugs hoch gehalten werden muss, kommen verstärkt Simulationstools in Kombination mit CAE-Systemen zum Einsatz. Hierdurch sollen kostenintensive Änderungen in späten Phasen reduziert werden. Da in der frühen Phase noch relativ wenige Daten vorliegen, wird häufig versucht mit Hilfe von Vorgängersystemen eine Grobabschätzung in einem annehmbaren Zeitrahmen zu generieren. Die erstellten digitalen Prototypen werden im weiteren Projektverlauf durch physische Prototypen erweitert, um fundiertere Aussagen zu erhalten. Dieser Übergang ist in Abbildung 4-1 in der mittleren Ebene dargestellt.

Den Übergang zur Serienentwicklung stellt die Zielvereinbarung mit den Fachstellen dar. Der Zeitpunkt der Unterzeichnung der Zielvereinbarung wird auch als „*point of no return*“ bezeichnet [GRABNER & NOTHAFT 2005, S. 24]. Das Gesamtfahrzeugkonzept ist bestimmt und der weitere Entwicklungsablauf inklusive der Reifegradziele durch die Prozessplanung festgelegt.

4.3.3 Serienentwicklung

In der Serienentwicklung werden die einzelnen Disziplinen mit der Ausarbeitung der Konzepte beauftragt. ABENDROTH [2008] gibt eine Zeitdauer von 26 Monaten für die Serienentwicklung an. Im Laufe der Entwicklung werden die Modifikationsfreiheiten

sukzessive eingeschränkt, um Festlegungen für die Planung der Fertigung zu ermöglichen. Die Synchronisation der einzelnen domänenspezifischen Entwicklungen erfolgt typischer Weise zu zentralen Meilensteinen. Die Integrationspunkte entsprechen virtuellen oder physischen Prototypen mit zunehmender Reife in Bezug auf den Serienanlauf. Eigenschaftsanforderungen und Funktionen werden getestet, bewertet und fließen wieder zurück in die entwicklungsverantwortlichen Fachbereiche, die auf dieser Basis weitere Optimierungen vornehmen. Zu Beginn der Serienentwicklung werden typischer Weise domänenspezifische Versuche zur Überprüfung der Teilsysteme verwendet. Mit fortschreitender Entwicklungszeit kommen dann Gesamtfahrzeugtests zum Einsatz. Die regelmäßige Abstimmung der Entwicklungsbeteiligten erfolgt insbesondere über interdisziplinäre Simultaneous Engineering Teams (SE-Teams).

Entwicklungsstufen der Konstruktion

Aus Sicht der Konstruktion ist für den schnellen Fortschritt der Entwicklungsreife und deren Überprüfung ein effizienter CAE-Prozess zu einem entscheidenden Faktor geworden. Dieser teilt sich typischer Weise in fünf Phasen [BRAESS & SEIFFERT 2005 S.749]:

- Datenbereitstellung
- Vernetzung (Finite Elemente)
- Modellaufbau
- Berechnung
- Auswertung (Postprocessing)

Die Konstruktion erstellt auf Basis des gewählten Konzeptes detaillierte CAD-Modelle. Mit Hilfe von Kollisionsuntersuchungen und Einbausimulationen kann die Baubarkeit des Fahrzeugs beurteilt werden. Aus den CAD-Modellen werden FEM-Modelle (Gittermodelle) abgeleitet. Diese Daten nutzt anschließend die Berechnung und Simulation, um Eigenschaften des Fahrzeugs zu überprüfen. Beispiele für virtuell überprüfte Eigenschaften sind Crashverhalten, Aerodynamik, Gesamtfahrzeugdynamik oder Wärmemanagement. Aber auch für die Auslegung von Sensoren, die Abschätzung von elektromagnetischen Unverträglichkeiten und die Optimierung von Fertigungsprozessen kommen Simulationsmodelle zum Einsatz. BRAESS & SEIFFERT betonen in Bezug auf einen schnellen Entwicklungsfortschritt die Wichtigkeit des Daten- und Informationsaustauschs zwischen CAD-Konstrukteuren, Berechnern und den versuchsdurchführenden Bereichen. HERFELD [2007] entwickelt aus dieser Motivation heraus eine Methode zur Identifikation der notwendigen Informationsvernetzung von Konstruktion und Simulation.

Die virtuelle Absicherung bietet durch die steigende Leistungsfähigkeit von Hard- und Software immer stärkere Vorteile in Bezug auf Zeit, Kosten und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse [GRUBER ET AL. 2005, KOJIMA 2000]. Auf Messungen und Versuche mit physischen Prototypen kann jedoch noch nicht vollständig verzichtet werden. BRAESS & SEIFFERT nennen drei Phasen der Hardwareerprobung [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 737]:

- Rapid Prototyping zur Untersuchung von Komponenteneigenschaften

- Teilsystemprototypen mit seriennahen Fertigungsverfahren
- Gesamtfahrzeugtests: Komponenten mit produktionsrepräsentativen Verfahren erstellt

Insbesondere sicherheitskritische und gesetzliche Anforderungen müssen umfangreich durch Versuche abgesichert werden. Die Versuche geben Aufschluss über den Erfüllungsgrad zuvor definierter Anforderungen, ermöglichen aber auch das Aufzeigen von Problemen, die vorab nicht in Betracht gezogen wurden. Viele Versuche lassen eine Auswertung nach objektiven Eigenschaften zu. Jedoch bestehen aus Kundensicht ebenfalls viele Anforderungen die lediglich subjektiv bewertet werden können. Objektiv bewertbare Eigenschaften, wären beispielsweise die Zugfestigkeit eines Bauteils oder der Energieverbrauch einer elektrischen Komponente. Hingegen betreffen subjektiv bewertbare Eigenschaften beispielsweise die Anmutung von Interieurelementen oder das bei der Türöffnung oder -schließung entstehende Qualitätsempfinden in Bezug auf Akustik und Gewicht der Tür.

Für die Erprobung von physischen Prototypen finden sich verschiedenste Versuchsumgebungen. Mittlerweile werden zum einen viele Versuche in Laboren durchgeführt. Hierfür werden spezielle Prüfstände benötigt. Zum anderen existieren meist eigene Teststrecken, auf denen das Gesamtfahrzeug dynamisch geprüft werden kann. Schlussendlich werden Gesamtfahrzeugtests unter möglichst verschiedenen äußeren Bedingungen durchgeführt.

Die Entwicklung und Absicherung von Steuergeräten und zugehöriger Software weist einige Besonderheiten im Vergleich zu dem zuvor beschriebenen Prozess auf und soll daher folgend gesondert vorgestellt werden.

Stufen der Systemintegration von Steuergeräten und Elektrik/Elektronik

Für die Funktionsbeschreibung der Steuergerätesoftware und deren simulativer Analyse kommen Modellierungstechniken wie Blockdiagramme und Zustandsautomaten zum Einsatz. Für die Überprüfung von neuen Funktionen im realen Umfeld wird das Verfahren des „*Rapid Control Prototyping*“ angewandt. Hierzu werden die Modelle ausprogrammiert und in echtzeitfähige Betriebssysteme eingebettet. Auf Spezialrechnern können dann die Funktionen in einem realen Auto getestet werden [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 600].

Die Absicherung und Integration von Steuergeräten und ihrer Software verläuft über mehrere Stufen von Einzelsteuergerätetests hin zu Gesamtfahrzeugtests. Im Rahmen der Einzelgerätetests werden die Steuergeräte in ihrem funktionalen Verhalten bis zur Schnittstelle zum Bordnetz überprüft. Das Steuergerät als eingebettetes Teilsystem wird mit Hilfe von sogenannten „*Hardware in the Loop*“ – Versuchsständen überprüft. Die reale Umgebung des Teilsystems und somit die Signale, die von anderen Steuergeräten oder Sensoren stammen, werden mit Hilfe eines *Hardware in the Loop* – Simulators vorgetäuscht. Dies erlaubt die gezielte Überprüfung des Steuergerätes und seiner Software unter Echtzeitbedingungen. Diese Komponententests werden meist direkt durch die entsprechenden Zulieferer durchgeführt [STERLER ET AL. 2007].

In den folgenden Integrationstests werden die Steuergeräte im Verbund getestet. Eine zentrale Herausforderung in diesem Zusammenhang ist die steigende Komplexität durch die

Verteilung von Funktionen, die damit verbundenen umfangreichen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Steuergeräten sowie die große Anzahl an Ausstattungsvarianten. Zunächst kommen zur Absicherung der Eigenschaften Laboraufbauten in Form sogenannter „Braedboards“ (Brettaufbauten) in Kombination mit *Hardware in the Loop* zum Einsatz. Die Brettaufbauten dienen zur Aufnahme der Steuergeräte, Sensoren, Aktoren und teilweise auch mechanischen Komponenten. Die Elektrik/Elektronik Komponenten werden mit den Steuergeräten über das Bordnetz verbunden. Abbildung 4-3 zeigt einen exemplarischen Brettaufbau der Firma Audi.

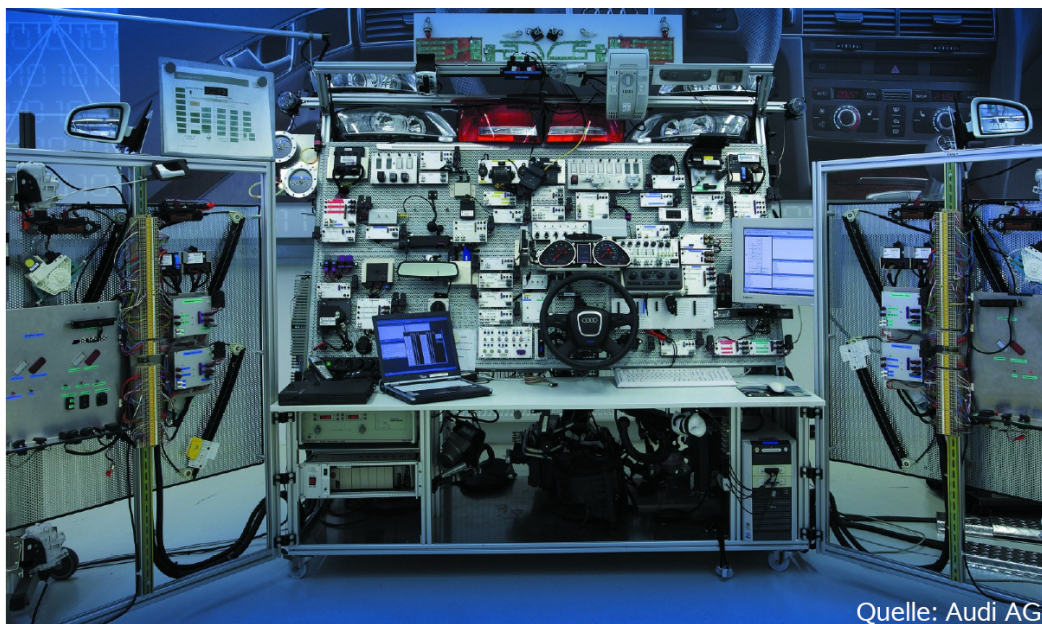


Abbildung 4-3: Brettaufbau der Firma Audi AG [SPINCZYK & STREICHER 2008]

Die nächste Stufe der Integrationstests stellen die Referenzfahrzeugtests dar. Das Referenzfahrzeug stellt ein reales Fahrzeug dar, an dem im Labor die gesamte Elektrik/Elektronik getestet werden kann [STERLER ET AL. 2007]. Anschließend folgen Dauerläuferproben und Intensivtests. In den Intensivtest werden die Fahrzeuge unter realen äußeren Bedingungen bewegt. Hierdurch können insbesondere stark kundenrelevante Funktionen und Anforderungen abgesichert werden. Die Intensivtests bewegen sich in einem Rahmen von 5000 Betriebsstunden und 350.000 Kilometern [ABENDROTH 2008]

Basierend auf den in den vorweggegangenen Kapiteln geschilderten Grundlagen der Entwicklung von Automobilen beschäftigt sich das folgende Kapitel mit der Analyse der zentralen Herausforderungen der interdisziplinären Serienentwicklung mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme.

5 Analyse der Herausforderungen der interdisziplinären Serienentwicklung

Im folgenden Kapitel werden die zentralen Herausforderungen der interdisziplinären Serienentwicklung mechatronischer Fahrzeugsysteme dargestellt. Die Erkenntnisse beruhen maßgeblich auf den in Kapitel 1.2 vorgestellten Projekterfahrungen. Bevor detailliert auf die Veränderung der Fahrzeugstruktur und die damit verbundene Interdisziplinarität eingegangen wird, stellt Kapitel 5.1. die Vorgehensweise der Analyse vor. In diesem Rahmen werden Erfolgsfaktoren und Vorgehensweisen für Dienstleistungsprojekte, die sich mit der Analyse des Produktentwicklungsprozesses im weiteren Sinne beschäftigen, abgeleitet. Die aufgezeigten Empfehlungen wurden aus Forderungen in der Literatur und gesammelten Erfahrungen des Autors in verschiedenen Prozessoptimierungsprojekten abgeleitet (vgl. Kapitel 1.2).

5.1 Vorgehensweise der Analyse

5.1.1 Vernetzte Betrachtung von Produkt, Prozess und Aufbauorganisation

Um eine optimale Lösungsentwicklung sicher zu stellen, ist im Rahmen der Analyse eine kombinierte Betrachtung von Produktstruktur, Entwicklungsprozess und Aufbauorganisation notwendig. Die Wichtigkeit der integrierten Betrachtung dieser drei Bereiche wird zwar durch einige Autoren in der Literatur betont [GRABOWSKI & GEIGER 1997, EVERSHEIM ET AL. 1995, KLEEDÖRFER 1999], jedoch bis dato in der Praxis immer noch zu wenig berücksichtigt. Darüber hinaus stellen EPPINGER & SALMINEN die Hypothese auf, dass Unternehmen, deren Einzelstrukturen (Produkt, Prozess, Organisation) sich überdecken, Vorteile gegenüber Unternehmen haben, bei denen dies nicht der Fall ist [EPPINGER & SALMINEN 2001]. Gleichwohl betont HERFELD, dass das Produkt als zentrale bestimmende Größe den Rahmen der Integration (Prozess) vorgeben sollte, jedoch eine Behandlung dieser Sichtweise in der Literatur vernachlässigt wird [HERFELD 2007, S.174].

Somit sollte das Produkt mit seinen wesentlichen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen insbesondere in Bezug auf Funktionen, Systemelemente, Anforderungen und Eigenschaften auch durch den Bearbeiter (Dienstleister) eines Prozessoptimierungsprojektes verstanden werden. Hierdurch wird gesichert, dass bei der Analyse des gelebten Prozesses geäußerte Probleme vor dem Hintergrund der technischen Herausforderungen richtig eingeordnet werden können. Zusätzlich ist das Produktverständnis Teilvoraussetzung dafür, dass der Dienstleister ein geeignetes Analysekonzept aufbauen kann. Eine detaillierte Kenntnis des Produktes und den damit verbundenen technischen Herausforderungen sichert dem Dienstleister auch die notwendige Akzeptanz in Interviews und Workshops mit Fachexperten des Auftraggebers. Die Kenntnis über technische Abhängigkeiten ermöglicht häufig die

Identifizierung von prozessbezogenen Schwachstellen, die von den Mitarbeitern nicht direkt erkannt werden. So sollten Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen und innerhalb von Funktionen, Systemelementen (im Sinne von physischen Komponenten) und Eigenschaften des Produktes durch entsprechende Kommunikations- und Abstimmungsstrukturen im Prozess und der Aufbauorganisation repräsentiert sein. Insbesondere bei Betrachtung von fachübergreifenden Kommunikations- und Informationsflüssen lassen sich durch diese indirekten Abhängigkeiten (vgl. 3.2.4) häufig erhebliche Verbesserungspotentiale identifizieren [vgl. GÖPFERT 1998, S. 145]. So nutzt HERFELD die Verknüpfung von Komponenten und Eigenschaften um den Informationsaustausch zwischen Simulations- und Konstruktionsverantwortlichen zu verbessern [HERFELD 2007].

Der gelebte Prozess unterscheidet sich meist vom definierten beziehungsweise durch entsprechende Dokumente vorgegebenen Prozess. Der Dienstleister sollte daher die festgelegten Abläufe kennen, um Abweichungen im operativen Geschäft identifizieren zu können. Teilweise werden die Gründe und Ursachen für das Abweichen vom Soll durch Mitarbeiter sehr direkt genannt, teilweise können diese jedoch erst durch die integrative Betrachtung von Produkt, gelebtem Prozess und „definiertem Sollprozess“ abgeleitet werden. Gleiches gilt in Bezug auf die, durch die Aufbauorganisation festgelegten, Entscheidungs- und Kommunikationsstrukturen.

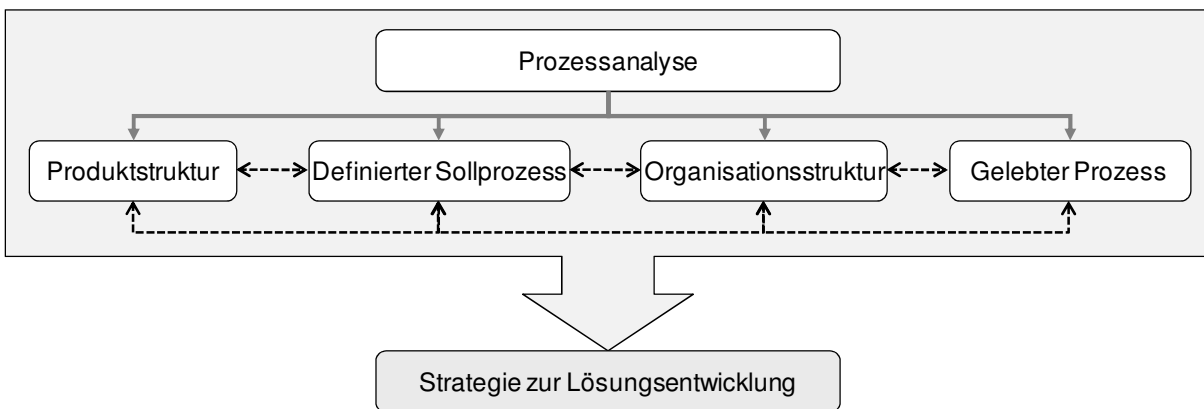


Abbildung 5-1: Integrierte Betrachtung von Produkt, Aufbauorganisation und Prozess

5.1.2 Anforderungen an Dienstleister und Ansprechpartner

Vor der Durchführung eines Dienstleistungsprojektes zur Prozessoptimierung sollten angemessene personelle Voraussetzungen geschaffen werden, um einen Erfolg des Projektes zu ermöglichen. Hierzu zählt zum einen die Festlegung eines Ansprechpartners auf Unternehmensseite. Dieser sollte neben einer ausreichenden Grundmotivation sowie genügend zeitlichen Ressourcen sehr gute soziale Kompetenzen besitzen. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da der Ansprechpartner im Unternehmen als motivierender und vermittelnder Part zwischen Dienstleister und Mitarbeitern agieren muss. Der

Ansprechpartner dient als puffernde und vermittelnde Instanz. Er sollte zum einen ein gutes Grundwissen in Bezug auf das technische Produkt, den zugehörigen Entwicklungsprozess und die damit verbundenen zentralen Herausforderungen haben, zum anderen aber auch bei Detailfragen der Analyse die richtigen Fachexperten und Fachdokumente ermitteln und vermitteln können.

Da viele Mitarbeiter bereits unter einem starken Zeit- und Leistungsdruck stehen und teilweise durch negative Erfahrungen mit Beratungsunternehmen Ressentiments existieren, ist es von enormer Bedeutung, Gespräche mit dem richtigen Einfühlungsvermögen vorzubereiten und gegebenenfalls zu motivieren. Durch das Aufzeigen der Chance sich aktiv an der Lösungsentwicklung beteiligen zu können und hierdurch die Möglichkeit zu besitzen die persönliche Situation zu verbessern, können Mitarbeiter trotz erheblichem Zeit- und Leistungsdruck angeregt werden, die Analyse zu unterstützen. Die Bereitschaft die Analyse und Lösungsentwicklung voran zu treiben, kann jedoch von Mitarbeiter zu Mitarbeiter extrem unterschiedlich ausfallen. Daher ist es hilfreich, wenn der Ansprechpartner bereits über ein persönliches Netzwerk im Unternehmen verfügt und somit Kenntnis über wichtige Schlüsselpersonen im projektbezogenen Themenkontext hat. Diese Ansprüche an den Ansprechpartner sollten vor Beginn des Projektes zwischen Dienstleister und Auftraggeber diskutiert werden oder zumindest als erfolgskritische Faktoren angesprochen werden.

Der Dienstleister selbst sollte im Rahmen der Analyse idealer Weise mit einem personell konstant gleichbesetzten Team auftreten. Im Team können die Rollen Gesprächsführung und Moderation sowie Protokollierung aufgeteilt werden. Dabei sollte jedoch eine starre Zuordnung dieser Rollen vermieden werden. Sinnvoll ist es, wenn sich die Personen gegenseitig ergänzen und unterstützen. Im Hintergrund können auf Seite des Dienstleisters weitere Personen bei der Erarbeitung von Analysekonzepten oder bei der Ergebnisaufbereitung mitwirken.

Der Dienstleister muss über eine umfangreiche Methodenkompetenz verfügen. Dies betrifft insbesondere Befragungsmethoden, Datenerhebungsmethoden, Produkt- und Prozessmodellierungsmethoden sowie Analysemethoden. Ebenfalls sehr wichtig sind gute Softskills. Hierzu zählen vordergründig Moderation, Gesprächsführung, Präsentation, Teamarbeit und Ergebnisaufbereitung. Zentrale Aufgabe des Dienstleisters ist es, die Menge an gesammelten Analyseinformationen zu verknüpfen, zu aggregieren und die wichtigsten Erkenntnisse transparent und nachvollziehbar darzustellen. Wie in Kapitel 5.1.1 erläutert, sollten Produkt und Prozess integrativ betrachtet werden. Daher muss der Dienstleister eine gute wissenschaftliche Grundbildung besitzen. Für die Aufnahme der produktbezogenen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen ist die Beherrschung verschiedener Systemmodellierungstechniken notwendig. Dies können einfache Funktionsmodellierungstechniken wie das relationsorientierte oder das umsatzorientierte Funktionsmodell sein [LINDEMANN 2007; S.118f], aber auch komplexere Methoden wie Multidomänen-Matrizen und stärkebasierte Graphen (siehe Kapitel 3.2.4). Der Dienstleister muss durch seine Tätigkeiten als Katalysator für den Erkenntnisgewinn wirken [DIEHL & STÖBER 2007, S. 211]. Ziel ist die Schaffung eines gemeinsamen Problemverständnisses, um anschließend angepasste Lösungskonzepte entwickeln zu können. Die angesprochenen Fähigkeiten und Aufgaben von Dienstleister und Ansprechpartner sind folgend zusammenfassend dargestellt.

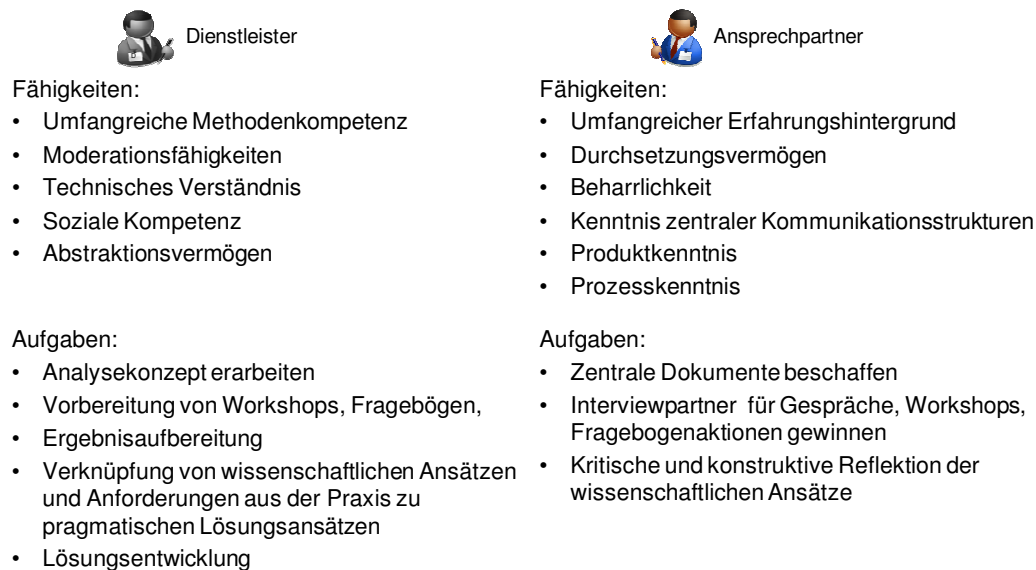


Abbildung 5-2: Kompetenzen und Aufgaben von Dienstleister und Ansprechpartner

5.1.3 Vorgehensmodell zur strukturbasierten Prozessanalyse

Das Vorgehen der Prozessanalyse kann in vier Hauptphasen eingeteilt werden. In der Vorbereitungsphase werden die Rahmenbedingungen geschaffen und das Thema sowie die grobe Zielrichtung festgelegt. Wichtig ist die Identifikation eines geeigneten Betrachtungsumfangs. Hierbei sollte produktseitig ein Teilsystem definiert werden, um das herum die Analyse geplant und ausgelegt wird. Der zentrale Ansprechpartner auf Unternehmensseite sollte festgelegt und ein grober Zeitplan mit den wichtigsten Arbeitspaketen definiert werden. Das Analysekonzept mit Zeitplan, Betrachtungsobjekt und Zieldefinition sollte anschließend in einem Kick-Off-Termin offiziell verabschiedet werden. Im Rahmen des Kick Offs haben die wichtigsten Unternehmensvertreter die Möglichkeit ihre Wünsche und Vorstellungen zu äußern. Gegebenenfalls ist eine Anpassung des Analysekonzeptes notwendig.

Anschließend kann in die frühe Phase der Analyse übergegangen werden. Wie in Kapitel 5.1.1 verdeutlicht, spielt die Analyse des Produktes eine wichtige Rolle. Daher sollte der Dienstleister in Zusammenarbeit mit dem Ansprechpartner und gegebenenfalls einem oder zwei Produktexperten das Produkt mit Hilfe geeigneter Modellierungstechniken abbilden. Geeignete Modelle stellen beispielsweise das relationsorientierte Funktionsmodell sowie das umsatzorientierte Funktionsmodell dar. Neben der produktseitigen Einarbeitung sollte der Ansprechpartner den Dienstleister über den Standardablauf des Entwicklungsprozesses und die zugehörige Aufbauorganisation informieren. Um eine geeignete Diskussionsgrundlage zu haben, sollten in diesem Abschnitt grobe Prozessmodelle des Betrachtungsbereichs erstellt

werden. Neben der Modellierung von Produkt und Prozess können bereits erste Problemfelder diskutiert und somit Schwerpunkte für die Detailanalyse gelegt werden. Für den Übergang zur Detailanalyse sollte das Analysekonzept verfeinert werden. Hierzu ist die Erstellung eines Terminplans für die einzelnen Workshops, Interviews und Fragebogenaktionen notwendig. Darüber hinaus sollte die Art der Datenerhebung und Datenaufbereitung durchdacht sein. Die Ausgestaltung der Detailanalyse ist stark von den Projektspezifika abhängig und kann daher an dieser Stelle nicht verallgemeinert werden.

Die einzelnen Bereiche der Detailanalyse werden in der Aggregationsphase aufbereitet und transparent dargestellt. Typischer Weise werden die zentralen Erkenntnisse und Handlungsbedarfe dem Unternehmen im Teilnehmerkreis der Kick Off Veranstaltung präsentiert. Eine solche Präsentation kann zusätzlich als Zwischenreflektion in der Detailphase eingeplant werden. Die aufbereiteten Ergebnisse müssen bewertet werden, um zu entscheiden, ob eine weitere Vertiefung der Analyse notwendig ist, oder ob mit der Lösungsentwicklung begonnen werden kann. Bereits in der Detailanalyse werden durch die befragten Mitarbeiter Lösungskonzepte geäußert und zusätzlich Ideen durch den Dienstleister generiert. Darüber hinaus sollten stetig wissenschaftliche Ansätze den identifizierten Problemen und Herausforderungen zugeordnet werden. Diese Sammlung dient anschließend als hilfreicher Grundstein für die Entwicklung der weiteren Lösungsstrategie.

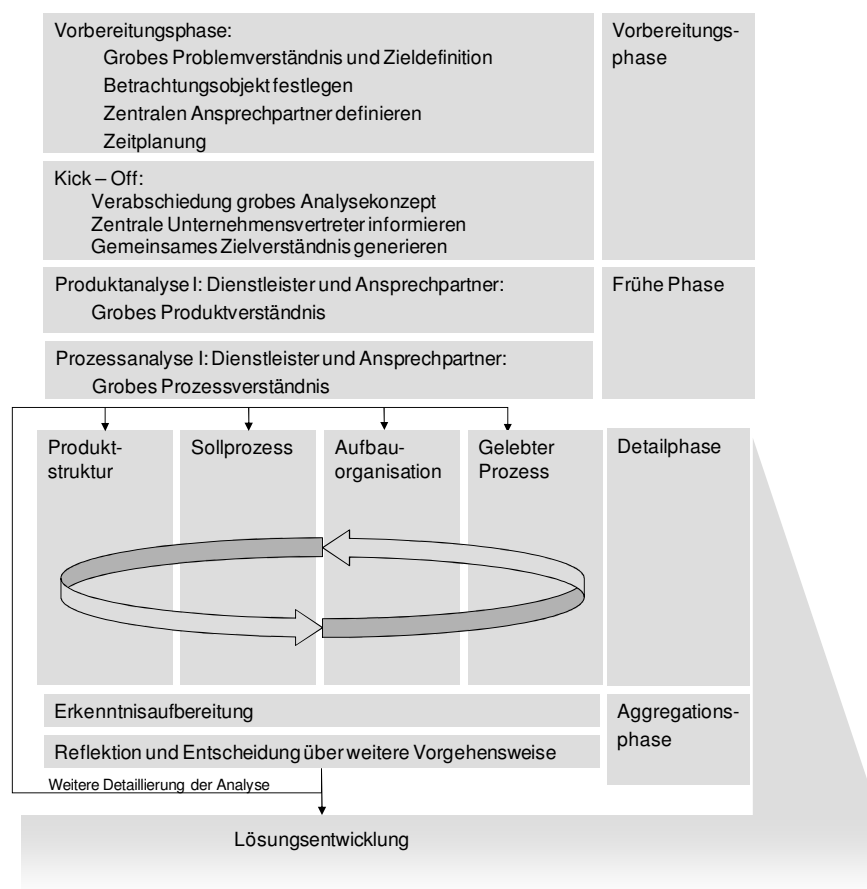


Abbildung 5-3: Vorgehensmodell eines Beratungsprojektes zur strukturbasierten Prozessanalyse

5.2 Identifizierte Herausforderungen

Ausgehend von der Analyse der strukturellen Veränderung des Automobils und der damit verbundenen gestiegenen Komplexität zeigen die folgenden Kapitel die zentralen Herausforderungen der interdisziplinären Zusammenarbeit im Serienentwicklungsprozess des Automobilbaus auf. Als zentrale Forderung wird aus der Analyse der Produktstruktur eine verstärkte Funktionsorientierung im Entwicklungsprozess mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme sowie der Gestaltung von Verantwortungsdefinitionen abgeleitet. Dieser Forderung werden bestehende Ausprägungen von Prozessgestaltung und Verantwortungsdefinition gegenübergestellt und aufgezeigt, wie hierdurch die Herausforderungen der interdisziplinären Entwicklung weiter verstärkt werden. Ergänzt wird dies durch die Analyse bestehender Werkzeuge, Methoden und Vorgehensweisen. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 6 eine Fokussierung der Lösungsentwicklung, um die dargestellten Herausforderungen zu bewältigen.

5.2.1 Herausforderungen durch Wandlung der Produktstruktur des Automobils

Das erste Automobil wurde durch Carl Benz entwickelt und im Jahre 1886 in Mannheim der Öffentlichkeit präsentiert. Es nutzte einen Verbrennungsmotor, um die im Treibstoff chemisch gebundene Energie in mechanische Energie zu wandeln und so das Gefährt zu bewegen. Das Automobil war somit ein rein mechanisches System. Erst später kam der Generator als Wandler von mechanischer in elektrische Energie zum Betrieb von elektrischen Verbrauchern wie Front- und Rücklicht hinzu. Es folgten elektronische Einspritzsysteme, Tempomat und schließlich die ersten elektronischen Regelsysteme wie die Getriebesteuerung [SEELIGER 2008]. Mechanisch/hydraulische sowie die rein elektronischen Regelungen wurden und werden stetig durch die Integration von Mikrocontrollern ersetzt. In Folge der steigenden Leistungsfähigkeit und der sinkenden Kosten der Mikrocontroller sowie der zunehmenden Elektrifizierung von mechanischen Komponenten steigt die Zahl der hierdurch realisierten kundenwerten Funktionen im Automobil in den letzten Jahren stark an [BOSCH 2007, S. 3FF]. Bedingt durch die starke Vernetzung der Mikrocontroller und der elektrischen Komponenten wie Sensoren und Aktoren in Verbindung mit der steigenden Funktionszahl erhöht sich zunehmend die Komplexität des Fahrzeugsystems. Das rein mechanische Automobil mit Verbrennungsmotor als Antrieb hat sich zu einem hochvernetzten mechatronischen System mit hybriden Antriebskonzepten gewandelt. Die vielseitigen funktionalen Wechselwirkungen und dynamischen Abhängigkeiten, werden jedoch laut BRAESS & SEIFFERT trotz umfangreichen Wissens über Komponenten- oder Teilsystemverhalten nur schwer beherrscht [BRAESS & SEIFFERT 2005, S. 597].

Wie in Kapitel 4.1 aufgezeigt, sind der Wertschöpfungsanteil und die Bedeutung der Elektrik und Software in den vergangenen Jahren enorm gestiegen ([BROSE 2008], [VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE 2005]). Dies führt zu einem Wandel des bauteilorientierten Charakters hin zu einem funktionalen Charakter des Autos. Funktionen können somit teilweise durch reine Implementierung von Software realisiert werden und bedürfen nicht mehr zwingend der

Neukonstruktion mechanischer Elemente. Die Veränderung der Produktstruktur über der Zeit sowie die Zunahme der Funktionen ist folgend qualitativ dargestellt (vgl. Tabelle 4-1).

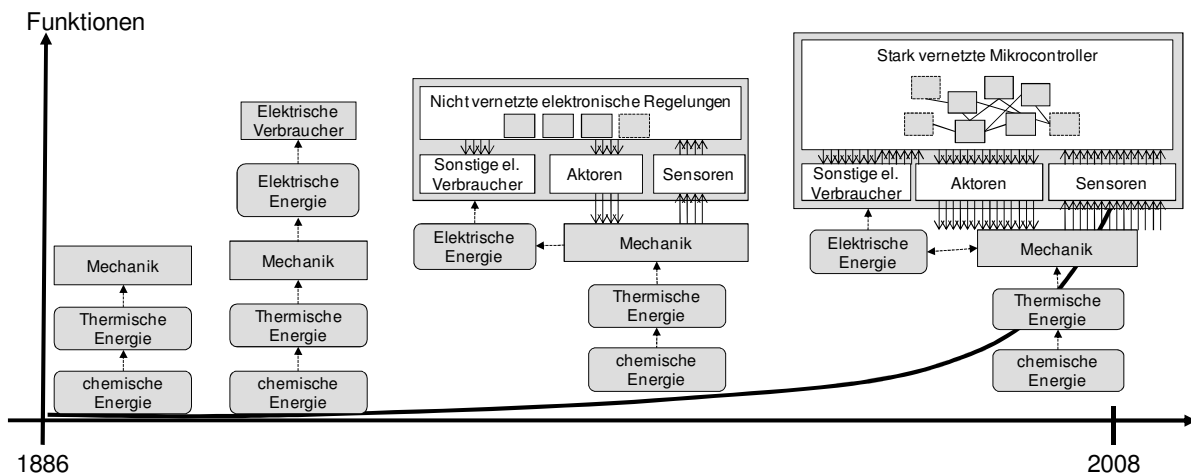


Abbildung 5-4: Veränderung der Produktstruktur des Automobils und Zunahme der Automobilfunktionen

Zusammenfassend sind somit heutige Automobilsysteme geprägt durch:

- einen hohen Anteil elektrischer und softwaretechnischer Komponenten,
- eine hohe Anzahl stark vernetzter Funktionen und hierdurch bedingt:
- eine starke Vernetzung der unterschiedlichen Systemelemente.

5.2.2 Praxisbeispiele

Die allgemein geschilderten Entwicklungen der Fahrzeugstruktur werden folgend am Beispiel des Schiebebedachs sowie des schlüssellosen Entriegelungssystems *Comfort Access* verdeutlicht.

Schiebebedach

Rein mechanische Schiebebedächer der Vergangenheit wurden über die manuelle Kraft des Benutzers bewegt. Die Bewegungskurve wurde dabei durch die Mechanik vorgegeben. Heutige Schiebebedächer werden durch den Nutzer über einen elektronischen Taster bedient. Das Signal des Tasters wird über ein Steuergerät eingelesen, interpretiert und zur Ansteuerung der Schiebebedachmotoren verwendet. Über Bürstenskabel werden die Kräfte der Motoren auf die Mechanik übertragen und führen so zur gewünschten Verstellbewegung. Dies entspricht lediglich einer Automatisierung des bisherigen manuellen Betriebs.

Die Automatisierung zieht jedoch eine sicherheitsrelevante Anforderung nach sich. Es muss sichergestellt werden, dass beim Bewegen des Schiebebedachs keine Gliedmaßen eingeklemmt werden. Aus diesem Grund ist ein Einklemmschutz zu realisieren. Hierfür wird

im Falle des durch den Autor untersuchten Schiebedachs die Motorschließkraft über Hallsensoren gemessen und im zugehörigen Steuergerät ausgewertet. Dieses Steuergerät wird im Folgenden *Funktionszentrum Dach* (FZD) genannt [KOSTAL 2005]. Sobald die sensierte Schließkraft einen Grenzwert überschreitet, wird das Schiebedach reversiert.

An das Funktionszentrum Dach sind weitere Sensoren angeschlossen. Hierzu zählt unter anderem der Regensensor, welcher hinter dem Rückspiegel an der Windschutzscheibe befestigt ist. Dieser Sensor ermöglicht die Implementierung einer Funktion, die das Eindringen von Wasser bei Regenfällen durch selbständiges Schließen vermeidet.

Die Signale des Regensensors werden aufbereitet und über den CAN-Bus an andere Steuergeräte geschickt, die beispielsweise für die Ansteuerung des Scheibenwischers zuständig sind. Über den CAN-Bus erhält das Funktionszentrum Dach ebenfalls Signale, die für die Ansteuerung des Schiebehebedachs relevant sind. Hierzu zählt die Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese wird verwendet, um bei höheren Geschwindigkeiten und geöffnetem Schiebehebedach den, durch den Fahrtwind entstehenden, Geräuschpegel zu reduzieren. So wird bei Überschreiten einer Grenzggeschwindigkeit zunächst automatisch ein Windabweiser ausgefahren, der für eine geräuschärmere Luftumlenkung sorgt. Wird die Geschwindigkeit weiter deutlich erhöht, kommt es typischer Weise zu dynamischen Druckschwankungen im Innenraum. Diese werden als störendes „Wummern“ wahrgenommen. Um diesen Effekt zu reduzieren, wird bei Überschreiten einer zweiten Grenzggeschwindigkeit das Schiebehebedach automatisch teilgeschlossen.

Weitere Daten werden vom Schließsystem des Fahrzeugs für die Ansteuerung des Schiebehebedachs verwendet. So hat der Benutzer die Möglichkeit alle Fenster inklusive Schiebedach von außen durch einen lang ausgeführten Verriegelungsbefehl zu schließen. Diese Funktion kann beispielsweise durch Drehen des Schlüssels im Türschloss in Schließrichtung aktiviert werden. Abbildung 5-5 zeigt den beschriebenen Fortschritt des Schiebehebedachsystems und der zugehörigen zentralen Kundenfunktionen. Die funktionalen Ausprägungen können länderspezifisch und kundenspezifisch über die Software angepasst werden. So besteht beispielsweise für Länder mit erhöhter Kriminalitätsrate die Möglichkeit den Einklemmschutz unter bestimmten Bedingungen zu deaktivieren, um einen über das Schiebehebedach eindringenden Kriminellen abzuschrecken.

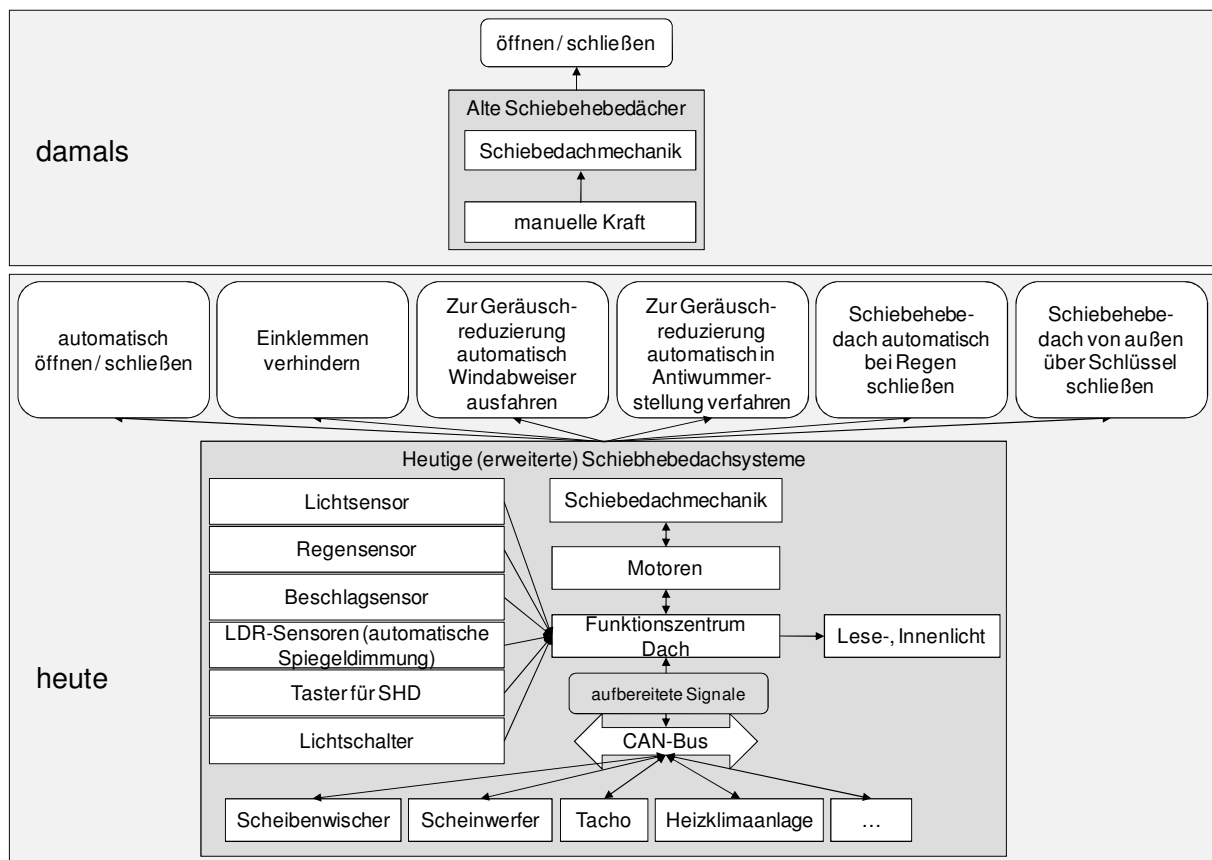


Abbildung 5-5: Vergleich alter mit aktuellen Schiebebedachsystemen

Schließsystem / Comfort Access

Eine ebenfalls starke Vernetzung weist das Schließsystem heutiger Fahrzeugsysteme auf. Früher wurde das Auto mit Hilfe eines Schlüssel-Schlosssystems mechanisch ent- und verriegelt, das Lenkrad über das Zündschloss bei gedrehtem Schlüssel freigegeben und der Motor ebenfalls über Zündschloss und Schlüssel gestartet.

In heutigen Fahrzeugsystemen kommen „schlüssellose“ Entriegelungssysteme zum Einsatz. BMW nennt dieses System „*Comfort Access*“ (übersetzt „komfortabler Zugang“). Andere Bezeichnungen sind „*Passive Entry*“ (Daimler) oder „*Keyless Access*“ (Volkswagen). Diese Systeme ermöglichen es dem Benutzer ohne Herausholen des Schlüssels das Fahrzeug zu öffnen und den Motor zu starten. Hierfür muss der Benutzer einen sogenannten ID-Geber mit sich führen. Dieser ist gleich zu setzen mit dem Schlüssel vergangener Tage. Sobald sich eine Hand dem Türaußengriff nähert, um diese zu öffnen, sensiert dies ein kapazitiver oder optischer Sensor, der in den Türgriff integriert ist. Dieser leitet die Information des Öffnungswunsches an das zugehörige Steuergerät weiter. Das Steuergerät initiiert anschließend eine Überprüfung der Zutrittsberechtigung. Hierfür werden Antennen angesteuert, die den ID-Geber auffordern seinen Identifizierungscode zuzusenden. Der

Identifizierungscode wird wiederum durch die Antennen empfangen und an das Steuergerät weitergeleitet, welches prüft, ob der gesendete Code freigeschaltet ist. Gegebenenfalls wird anschließend das Türschloss entriegelt. Dies passiert in so kurzer Zeit, dass der Benutzer ohne Unterbrechung seine Türöffnungsbewegung ausführen kann.

Komfortable Zugangssysteme erlauben darüber hinaus das schlüssellose starten des Motors über einen Start/Stop-Taster neben dem Lenkrad. Hierfür wird mit Hilfe der Antennen geprüft, ob sich der Schlüssel mit passender ID im Fahrzeuginneren befindet. Ist dies der Fall wird das Lenkrad freigegeben und das Motorsteuergerät über das zu erfolgende Starten des Motors informiert. Die Funktion zur Identifizierung der Schlüsselposition wird ebenfalls genutzt, um den Benutzer auf einen im Innenraum vergessenen Schlüssel aufmerksam zu machen. So wird die Heckklappe automatisch wieder aufgeworfen sobald sich der ID-Geber im Kofferraum befindet. Möchte der Nutzer den Wagen über einen am Außengriff befindlichen Taster zusperren, so wird er bei sich im Inneren befindlichem ID-Geber per Warnblinkanlage und Signalton darüber informiert, dass dies nicht möglich ist.

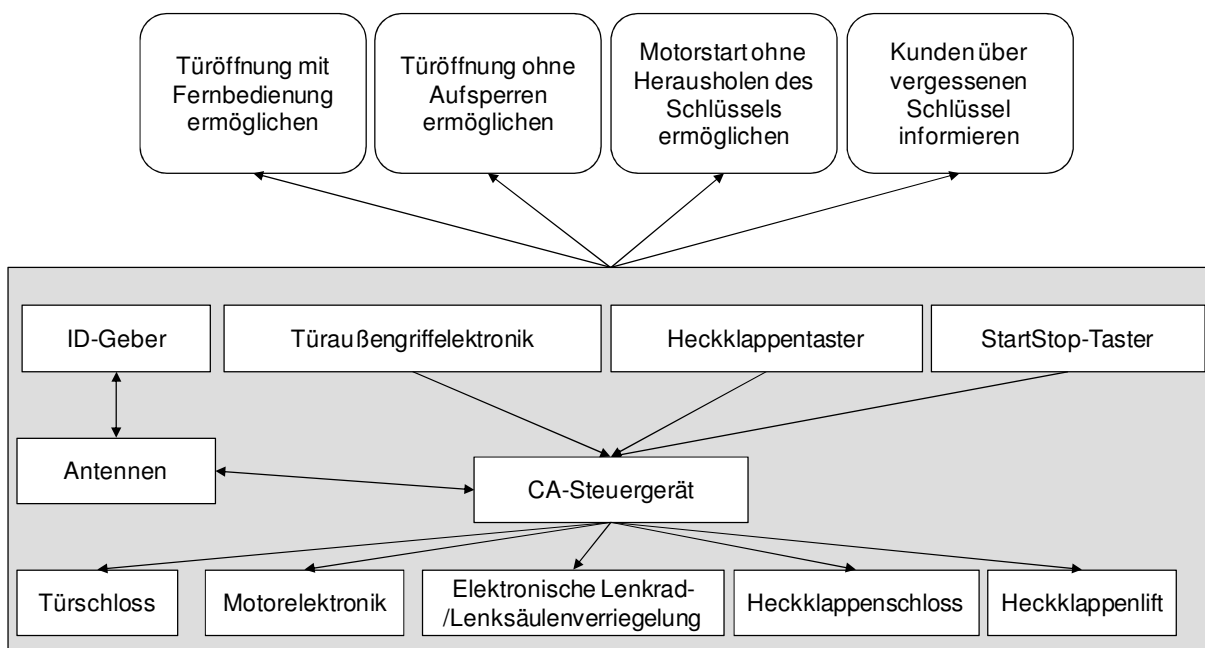


Abbildung 5-6: Zentrale Kundenfunktionen des Comfort-Accesssystems und beteiligte Systemelemente

5.2.3 Herausforderungen durch erhöhte Interdisziplinarität

Der beschriebene Wandel der Fahrzeugstruktur geht einher mit einer erhöhten Interdisziplinarität im Entwicklungsprozess. Der klassische Maschinenbauer muss intensiv mit Elektrotechnikern und Informatikern zusammenarbeiten. Daher hat die Veränderung der Produktstruktur direkte Auswirkungen auf Prozess und Organisation.

Dies ist jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden. So stellen GAUSEMEIER & LÜCKEL fest, dass Maschinenbauer bauteilorientiert und Elektrotechniker sowie Informatiker beziehungsweise Regelungstechniker funktionsorientiert denken und arbeiten [GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000, S. 50]. Zwar darf dies nicht als absolute Kategorisierung gesehen werden, da beispielweise die Elektrotechniker durchaus auch bauteilorientiert denken, jedoch ist unverkennbar, dass die an der Entwicklung mechatronischer Systeme beteiligten Fachbereiche laut SCHÖN zum Teil völlig verschiedene Begriffswelten, Erfahrungswissen und Vorgehensweisen aufweisen [SCHÖN 2000, S. 51]. Dem Umstand der geänderten Produktstruktur und der damit verbundenen Interdisziplinarität wird bis dato ungenügend durch eine Anpassung der gewachsenen Strukturen in Prozess und Aufbauorganisation Rechnung getragen. Hinzu kommen Probleme in Bezug auf die Kompetenzen der Mitarbeiter. So fehlen laut Aussagen verschiedener Interviewpartner Ingenieure, die „beide Welten“ also sowohl die elektrotechnische / softwaretechnische als auch die Maschinenbauseite kennen und verstehen. Der Bedarf einer Anpassung von Prozess- und Aufbauorganisation an den verstärkten Funktionscharakter der Produktstruktur soll im folgenden Kapitel mit Hilfe eines Vergleichs verdeutlicht werden.

5.2.4 Strukturbedingter Bedarf einer stärkeren Funktionsorientierung

Durch die Zunahme des Anteils funktionsgeprägter Systemelemente und deren Vernetzung untereinander und mit mechanischen Systemelementen stoßen klassische bauteilorientierte Entwicklungsprozesse und Organisationsstrukturen an ihre Grenzen und bereiten zunehmend Probleme [BRAESS & SEIFERT 2005, S. 598]. Der notwendige integrative Charakter wird zu wenig gefördert. Der Bedarf eines strukturbedingten Paradigmenwechsels hin zur Funktionsorientierung soll durch einen Vergleich mechatronischer Systeme mit der Struktur des menschlichen Körpers verdeutlicht werden.

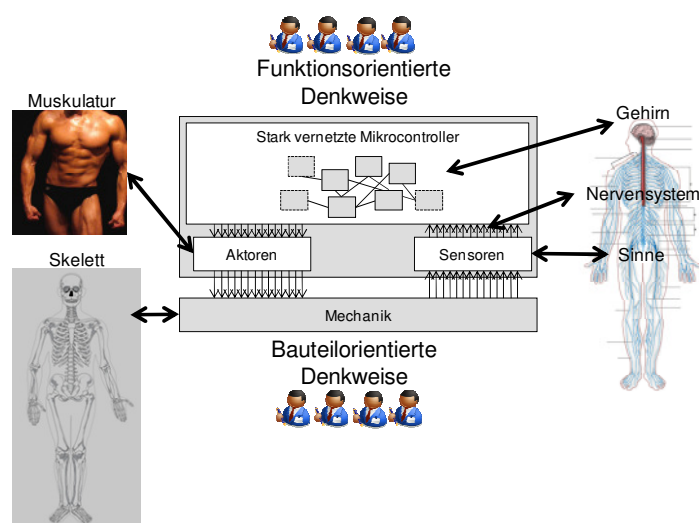


Abbildung 5-7: Vergleich eines mechatronischen Systems mit dem menschlichen Körper

Das Skelett eines Menschen trägt dessen Muskeln und das Nervensystem. Es dient, wie die meisten mechanischen Bauteile im Auto, der Übertragung von Kräften und Momenten. Die Muskeln entsprechen den Aktoren im mechatronischen System. Sie bewegen das Skelett. Analog können die sieben Sinne des Menschen mit den Sensoren des Fahrzeugs verglichen werden. Um jedoch die Signale der Sensoren weiterzuleiten, ist ein Bordnetz in Form eines Nervensystems notwendig. Über dieses Nervensystem werden zusätzlich die Muskeln angesteuert.

Würde die Konstruktion des menschlichen Körpers an dieser Stelle abgebrochen, so wäre er nicht funktionsfähig. Es bedarf einer steuernden und regelnden Instanz in Form des Gehirns, um die Teilsysteme für die Ausführung von Funktionen benutzen zu können. Der Mensch erlernt und trainiert diese Fähigkeiten in seinem Leben. So kann ein Baby nur grob und sehr unkoordiniert mit der Umwelt interagieren. Erst durch eine lange und intensive Lernphase ist der Mensch dann zu Hochleistungen wie Sportaktivitäten fähig. Der Mensch erweitert dabei seine Fähigkeiten nicht durch Anpassung der Skelettstruktur sondern primär durch Erlernen neuer Steuerungs- und Regelmechanismen.

Übertragen auf das Automobil bringt erst eine erhöhte Intelligenz in Form von Mikrocontrollern sowie die damit verbundene Elektrifizierung die Möglichkeiten übergeordnete Funktionen wie Fahrerassistenzsysteme zu realisieren. Folglich muss die Entwicklung von Fahrzeugsystemen stärker als bisher als Top-Down Entwicklung von Kundenfunktionen begriffen und die zugehörigen Prozessstrukturen entsprechend modelliert werden. Ansonsten besteht die Gefahr dass die „Gliedermaßen“ nicht zu den „Steuerbefehlen des Gehirns“ passen. Entsprechend müssen auch die Verantwortungsbereiche stärker nach Gesichtspunkten einer funktionalen Fahrzeuggliederung strukturiert werden. Die Funktionsorientierung muss als Grundprinzip im Sinne eines integrativen Ansatzes ebenfalls für das Anforderungsmanagement in Verbindung mit Freigabeumfängen angewandt werden. Die aufgeführten Bereiche einer stärkeren Funktionsorientierung sind, wie bereits angesprochen, stark von einander abhängig und sollten daher gemeinsam angegangen werden. Schwachstellen und Grenzen klassischer Prozess- und Organisationsstrukturen, die dieser Forderung entgegenstehen, werden in den folgenden Kapiteln detaillierter diskutiert.

5.2.5 Herausforderungen durch intransparente Prozessdarstellungen

Die prinzipielle Logik der identifizierten Herausforderungen im Serienentwicklungsprozess soll an Hand der folgenden vereinfachten Grafik erläutert werden. Als Produktbeispiel wird auf das Schiebebedach zurückgegriffen.

Software und Elektronik weisen eine Prozesswelt auf, die sich stark von den klassischen Konstruktionsbereichen (Fahrwerk, Karosserie) unterscheidet. Die Verschiedenartigkeit der Prozesswelten wird besonders deutlich durch unterschiedliche Bezeichnungssysteme der Meilensteine. Hinzu kommen differierende Zeitraster der disziplinspezifischen Meilensteine und andersgeartete Freigabesysteme. So sind Freigaben auf Seiten der Fahrwerkentwicklung stark bauteilgetrieben, hingegen auf Seiten Software und Elektrik / Elektronik eher funktionsgetrieben [vgl. HERFELD 2007, S.46]. Dies steht im direkten Zusammenhang mit der Unterschiedlichkeit der Systemstrukturierung nach funktionalen beziehungsweise

bauteilorientierten Gesichtspunkten. Bedingt durch die ungleichen Darstellungsweisen, Begriffswelten und Vorgehensweisen, mangelt es häufig an einem übergreifenden Verständnis in Bezug auf Inhalt und Bedeutung der domänenfremden Meilensteine für die Phase der Integration und Absicherung.

Dies wird verstärkt durch ein mangelndes Verständnis produktbezogener Abhängigkeiten über Disziplingrenzen hinweg. Die Denkweise der einzelnen Mitarbeiter ist stark fokussiert auf das jeweils verantwortete Systemelement. Erfahrene Entwickler kennen meist die wichtigsten kritischen Stellen disziplinübergreifender Abhängigkeiten. Wird jedoch die Verantwortung übergeben oder handelt es sich um ein neues Produkt oder Teilsystem, werden Probleme häufig erst im Rahmen der Integrations- und Absicherungsaktivitäten sichtbar. In solchen Fällen werden notwendige Kommunikationsstrukturen und Informationsflüsse nicht erkannt.

So kann beispielsweise bei der Entwicklung eines Schiebebedachs eine Nichtbeachtung der Wechselwirkung zwischen Dichtungshärte und Einklemmschutz zu erheblichen Fehlentwicklungen führen. Da der Algorithmus zur Erkennung des Einklemmfalles auf der indirekt gemessenen Motorkraft basiert, muss die Parametrierung auf Basis eines festen mechanischen Systems mit gleichen Schließwiderständen erfolgen. Ändert nun ein Konstrukteur oder Zulieferer die Dichtungshärte ohne dies Abzustimmen, weil ihm die Abhängigkeit zum Einklemmschutz nicht bewusst ist, entwickelt der Informatiker den Algorithmus für den Einklemmschutz auf einer falschen Annahme. Dieser Missstand wird jedoch zeitverzögert erst in der Absicherung aufgedeckt und führt dann zu erhöhten Änderungskosten.

Die domänenübergreifenden Integrationsmeilensteine, die der Überprüfung von Funktionen und Eigenschaften dienen, decken somit häufig Schwachstellen auf, die auf Grund nicht beherrschter Komplexität und der damit verbundenen disziplinübergreifenden Abhängigkeiten entstanden sind. So stellt WALTHER fest, dass die Integrationsprobleme „...auf die unzureichende Abstimmung des Gesamtsystems während der Entwicklung der Einzelkomponenten“ zurückzuführen sind [WALTHER 2001]. Die verwendeten Prozessdarstellungen unterstützen dabei bis dato eine integrative Herangehensweise nur unzureichend. Eine angemessene Berücksichtigung der sich in den letzten Jahren geänderten Produktstruktur ist in den aktuell verwendeten Prozessdarstellungen nicht erkennbar. Der Bedarf einer integrierten Darstellungsweise des Produktentwicklungsprozesses trifft hingegen in der Realität auf disziplinspezifische Prozesswelten. Auf Grund der umfangreichen Versuchs- und Berechnungslandschaft in den Automobilunternehmen bestehen häufig erhebliche Intransparenzen, wer welche Entwicklungsinhalte mit welchem Reifegrad wann benötigt und für wen welche Versuchsergebnisse relevant sind. Im schlimmsten Falle kann dies dazu führen, dass Versuche nicht fristgerecht durchgeführt werden können oder fälschlicher Weise mit veralteten Entwicklungsständen erfolgen. Die Folgen der Intransparenz kumulieren sich meist zum Ende der Serienentwicklung und führen zu kurzfristigen Änderungsbedarfen und hierdurch zu erhöhten Kosten. HERFELD macht hierfür die zu starke Ausrichtung der Prozessmodelle an der Reife der Komponenten verantwortlich und fordert eine stärkere Orientierung der Prozessmodelle an zu entwickelnde Funktionen und Eigenschaften [HERFELD 2007, S. 46].

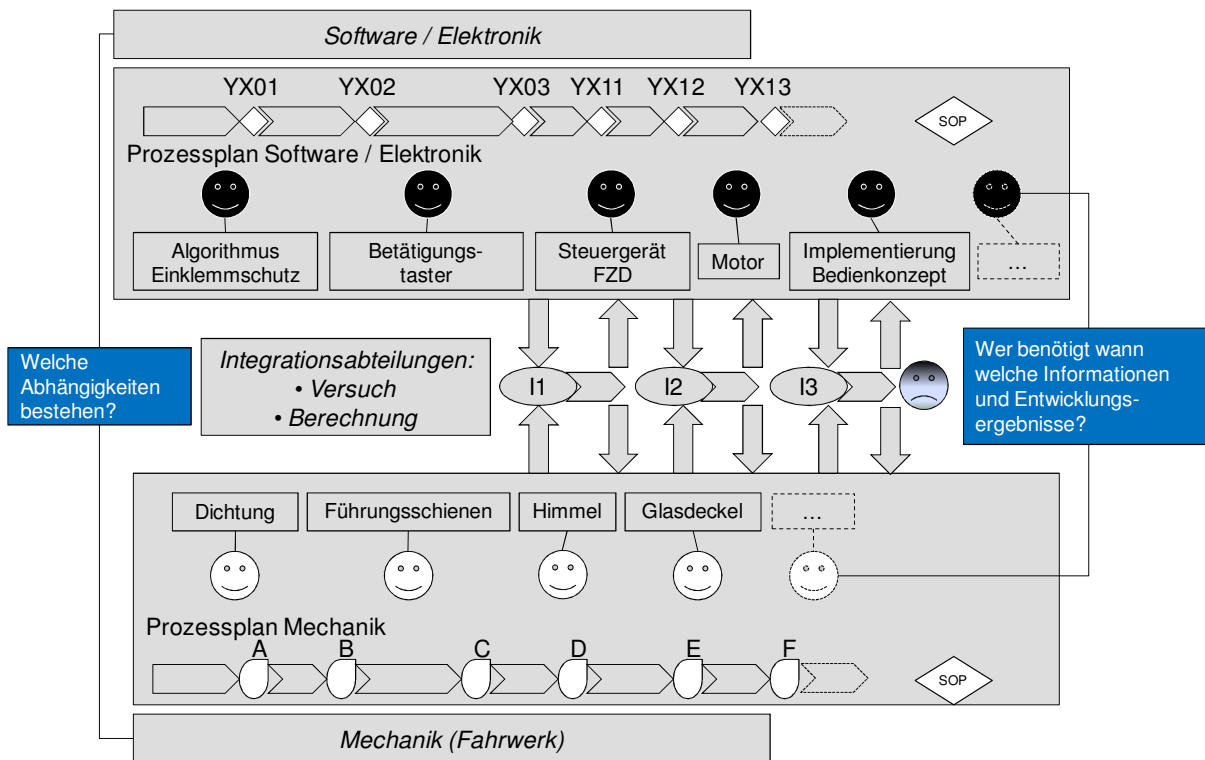


Abbildung 5-8: Verdeutlichung der Herausforderungen durch zu stark getrennte Prozesswelten

Die Schwachstellen der verwendeten Prozessdarstellungen des Serienentwicklungsprozesses können somit zusammenfassend charakterisiert werden als:

- Mangelnde Förderung der interdisziplinären Kommunikation
- Intransparenz durch domänenspezifische Prozesswelten und Prozessdarstellungen
- Prozessmodellierung stark losgelöst von der Produktstruktur
- Intransparenz in Bezug auf absicherungsbezogene Integrationsaktivitäten
- Domänenspezifische Freigabesysteme: Funktionsbezogen versus stark komponentenbezogen

REICHART [2005] drückt den aufgezeigten Handlungsbedarf in Bezug auf die Prozesswelten als die Notwendigkeit einer integrierten Prozesssichtweise aus. Er stellt diese Vision als eine stärkere Interaktion zwischen den Bereichen Fahrwerkentwicklung, Antrieb und Elektrik / Elektronik dar:

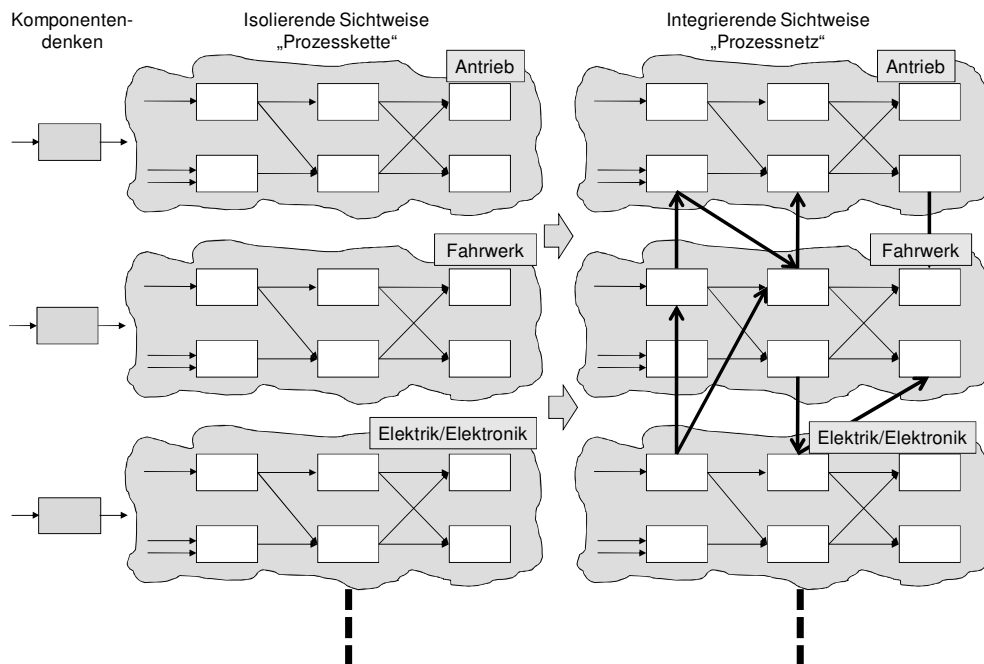


Abbildung 5-9: Notwendiger Wandel zur integrierten Prozesssichtweise [REICHART 2005]

5.2.6 Herausforderungen durch intransparente Verantwortungsstrukturen

Klassische Verantwortungsstrukturen in der Automobilindustrie sind bauteilbeziehungsweise komponentenorientiert. Da sich jedoch das Automobil und seine Produktstruktur, wie in Kapitel 5.2.1 aufgezeigt, zu einem mechatronischen System mit erhöhtem Vernetzungsgrad der Teilsysteme gewandelt hat, werden die bauteilbeziehungsweise komponentenorientierten Verantwortungsstrukturen der erhöhten Interdisziplinarität und Komplexität nicht mehr gerecht. Aus diesem Grund finden sich in der näheren Vergangenheit in der Industrie Ansätze die Verantwortlichkeiten funktionsorientiert aufzuhängen. Für eine effektive Umsetzung mangelt es jedoch häufig an einer systematischen Top-Down Untergliederung des gesamten Autos in funktionale Haupt- und deren Unterblöcke, denen dann Bearbeiter und Verantwortlichkeiten zugeordnet werden können. Da Funktionen durch physische Komponenten beziehungsweise Software realisiert werden, ist eine rein funktionale Verantwortung nicht sinnvoll, sondern muss mit einer komponentenorientierten Verantwortung vernetzt werden.

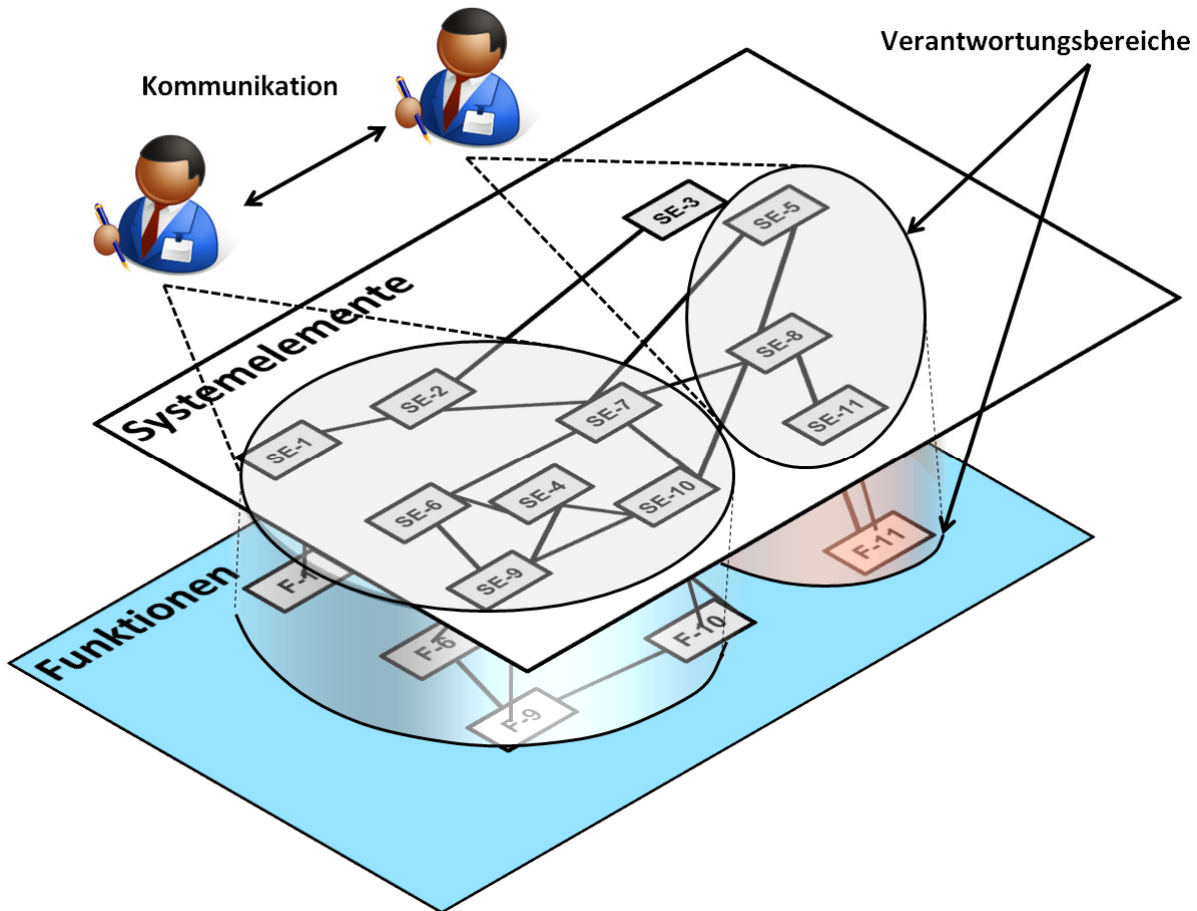


Abbildung 5-10: Vernetzung von funktionsorientierter und komponentenorientierter Verantwortung

Bis dato finden im operativen Alltag der Serienentwicklung transparente Darstellungen, die die funktionalen Verantwortungsbereiche sowie die Vernetzung dieser mit den Komponentenverantwortlichkeiten darstellen, keine Anwendung. Wer alles an der Entwicklung einer Funktion beteiligt ist, kann meist nicht ohne weiteres aufgezeigt werden, sondern ist häufig in Form von Erfahrungswissen im Unternehmen verankert. Auch ist häufig unklar, wer auf Grund von zentralen Abhängigkeiten der verantworteten Systembereiche miteinander kommunizieren sollte. Somit besteht ein erheblicher Bedarf für die Anwendung von Modellierungstechniken, die das zu entwickelnde System integrativ darstellen. Integrativ bedeutet in diesem Zusammenhang eine Systemdarstellung, die disziplinübergreifend lesbar ist und verschiedene Sichten auf das System vereinigt. Hierzu zählen die funktionale Sicht, die Bauteilsicht und die Mitarbeiter- beziehungsweise Verantwortungssicht. Eine rein funktionale Sicht ist zur Definition der Verantwortlichkeiten nicht ausreichend. Es muss darüber hinaus bekannt sein, welche Systemelemente der Realisierung einer Funktion dienen, um nachvollziehen zu können, wie von funktionaler Verantwortung auf Bauteilverantwortung und umgekehrt geschlossen werden kann.

Neben Funktions- und Komponentensicht kann als dritte Sicht die Eigenschafts- oder Merkmalssicht aufgeführt werden. So weisen die physischen Bauteile spezifische Eigenschaften wie Gewicht, Größe oder Material auf, die durch komplexe Wechselwirkungen Gesamtfahrzeugeigenschaften bestimmen und daher in Form von Anforderungen festgelegt werden müssen. Deren Erreichung muss durch die Entwicklungs- und Absicherungstätigkeiten im Produktentwicklungsprozess ebenfalls sichergestellt werden. Aus diesem Grund werden häufig zusätzlich Verantwortlichkeiten für Eigenschaftsfelder festgelegt. Dieser Aspekt wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt. Hierfür sei auf die Arbeiten von HERFELD [2007] und KLEEDÖRFER [1999] verwiesen, die sich mit der Vernetzung von Bauteilen und Eigenschaften beschäftigen.

Zusammenfassend bestehen in Bezug auf die Verantwortungsstruktur somit folgende Herausforderungen:

- Mangelnde Transparenz in Bezug auf funktionsbezogene Verantwortungsbereiche.
- Mangelnde Transparenz in Bezug auf systemelementbezogene Verantwortungsbereiche.
- Mangelnde Transparenz der Vernetzung dieser Verantwortungsbereiche.
- Mangelnde Transparenz wichtiger Kommunikationsstrukturen auf Grund von zentralen Wechselwirkungen zwischen verantworteten Bereichen.

5.2.7 Mangelnde Komplexitätsreduktion durch Werkzeuge und Vorgehensweisen

Um die Komplexität heutiger Automobile besser beherrschen zu können, müssen neben einer stärkeren Funktionsorientierung geeignete Werkzeuge zur disziplinübergreifenden Produktplanung, Produktentwicklung und Verwaltung bereit gestellt werden. Aktuelle Systeme aus den Bereichen CAX, PDM, PLM und EDM weisen noch erhebliche Schwachstellen in Bezug auf ihre Vernetzung, ihre Benutzerfreundlichkeit und die Möglichkeit der Funktionsorientierung auf [WEBER 2005], [WARKETIN & HERBST 2007]. So betont WEBER, dass die "PDM/PLM und ERP-Systeme lediglich eine hierarchische Sicht auf Produkte oder Systeme bieten". Dies widerspricht jedoch dem Bedarf der Ingenieure nach mehreren oder multiplen Sichten in Abhängigkeit der Aufgabe. WEBER behauptet darüber hinaus, dass die große Anzahl an zum Teil sehr komplexen Tools eher die Komplexität erhöht, als dass sie dadurch beherrscht werden könnte [WEBER 2005]. Zwar haben sich in der Vergangenheit einige Forschungsprojekte mit der Entwicklung integrierter Entwicklungsumgebungen beschäftigt ([REINHART 2001], [GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000]), jedoch finden diese Ansätze in der Automobilindustrie so gut wie keine Anwendung.

Im Rahmen der durchgeführten Analysen konnten erhebliche Schwachstellen in Bezug auf die Kenntnis grundlegender Abhängigkeiten zwischen und innerhalb der Bereiche Systemelemente / Komponenten, Funktionen und Verantwortlichkeiten identifiziert werden. Zwar werden in der projektbezogenen Vorphase Funktionshierarchien verwendet, um die Gesamtfunktionen der Teilsysteme in Teilfunktionen zu zerlegen und Systemelemente zuzuordnen, jedoch wird im weiteren Entwicklungsverlauf immer noch deutlich zu wenig

methodisch und systemtechnisch vorgegangen und gearbeitet. Geeignete Systemmodellierungen zur Unterstützung der interdisziplinären Zusammenarbeit kommen nach wie vor nur vereinzelt zur Anwendung.

Zusammenfassend bestehen in Bezug auf die Werkzeuge, Methoden und Vorgehensweisen somit folgende Herausforderungen:

- Mangelnde Unterstützung bei der Komplexitätsbeherrschung durch aktuell verwendete Softwaresysteme.
- Mangelnde Verankerung von Methoden und methodischen Vorgehensweisen im Produktentwicklungsprozess.
- Mangelnder Einsatz von Systemmodellierungstechniken zu Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses.

5.3 Zusammenfassung und Fazit

Der Entwicklungsprozess moderner Automobile ist geprägt durch einen hohen Grad an Interdisziplinarität. Dies ist bedingt durch die Wandlung des Automobils von einem rein mechanischen hin zu einem mechatronischen System [VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE 2005; BRAESS 2006]. Motiviert ist diese Wandlung insbesondere durch gestiegene Sicherheitsanforderungen, härtere Umweltgesetze, stärkere Kundenorientierung sowie Gewichts- und Kostenvorteile bei der Verwendung von mechatronischen Systemen (siehe Kapitel 2.1). Die Zunahme an mechatronisch realisierten Funktionen führt zu einem steigenden Vernetzungsgrad der einzelnen Systemelemente [BOSCH 2007, S. 17]. Hierdurch erhöht sich wiederum die Komplexität des Gesamtsystems, seiner Teilsysteme und der zugehörigen Entwicklungsprozesse [WARKETIN & HERBST 2007]. Bedingt durch die gestiegene Komplexität des Gesamtsystems und seiner Subsysteme ist eine effizientere Abstimmung der einzelnen Fachbereiche notwendig.

Um die aufgezeigten Herausforderungen der Entwicklung mechatronisch geprägter Automobile zu bewältigen, sind Maßnahmen auf Makro- und Mikroebene notwendig. Die Makroebene stellt dabei die Unternehmensebene dar, auf der strategische Voraussetzungen geschaffen werden müssen. So sollte eine optimale Gestaltung der Organisationsstruktur stärker die spezifischen Merkmale der geänderten Produktstruktur aufgreifen und berücksichtigen [vgl. EVERSHEIM 2005; EHRENSPIEL 2007, S. 45F]. Der aufgezeigte verstärkte funktionale Charakter der Fahrzeugstruktur sollte sich somit in Darstellung und Strukturierung des Produktentwicklungsprozesses (PEP) sowie in der Definition und Darstellung von Verantwortungsbereichen wiederfinden. Ziel muss es sein hierdurch die Grundvoraussetzung für eine größere Transparenz in Aufbau- und Ablauforganisation zu schaffen und somit die Grundbausteine für eine verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit zu legen, die wiederum zu einer Verbesserung der Komplexitätsbeherrschung führen sollte. Die stärkere Funktionsorientierung sollte darüber hinaus mit weiteren Bereichen wie Baukasten- und Plattformstrategien abgestimmt werden und sich in diesen wiederfinden [SEKOLEC 2005]. Basisvoraussetzung für eine optimale Gestaltung all dieser Bereiche ist eine

systematische Analyse der Produktstruktur und die damit verbundene funktionale Top-Down Zergliederung des Fahrzeugs ausgehend von den zentralen Kundenfunktionen sowie die Verknüpfung von funktionaler und komponentenorientierter Sichtweise (vgl. [GOEPFERT 1998, S.91ff]).

Zur Beherrschung der gestiegenen Komplexität mechatronisch geprägter Automobile und der damit verbundenen Interdisziplinarität im Entwicklungsprozess muss eine stärkere Funktionsorientierung auch durch Entwicklungs- und Verwaltungswerkzeuge (CAX, PDM, PLM) unterstützt werden. So sehen WARKETIN & HERBST bedingt durch den hohen Anteil an Elektronik und Software die klassische (reine) Komponentenorientierung als nicht mehr angemessen an. Sie fordern daher in Bezug auf PLM-Systeme eine verstärkte Funktionsorientierung. Insbesondere die Visualisierung und Auswertung von Funktionsstrukturen in Bezug auf die Gestaltung von Workflows wird durch heutige PLM-Systeme zu wenig unterstützt [WARKETIN & HERBST 2006]. Gleiches gilt für den Bereich der CAX-Werkzeuge [WEBER 2005].

Als weiteres zentrales Element auf der Makroebene sieht der Autor die Schaffung einer kritischen methodischen und systemtechnischen Masse durch Schaffung von Anreizsystemen sowie organisatorischen und personellen Maßnahmen. Die Anwendung von Systemmodellierungen und Methoden muss erheblich stärker im gesamten Produktentwicklungsprozess verankert werden, um die interdisziplinäre Kommunikation und das interdisziplinäre Systemverständnis zu verbessern und hierdurch Effektivität und Effizienz trotz erhöhter Komplexität steigern zu können.

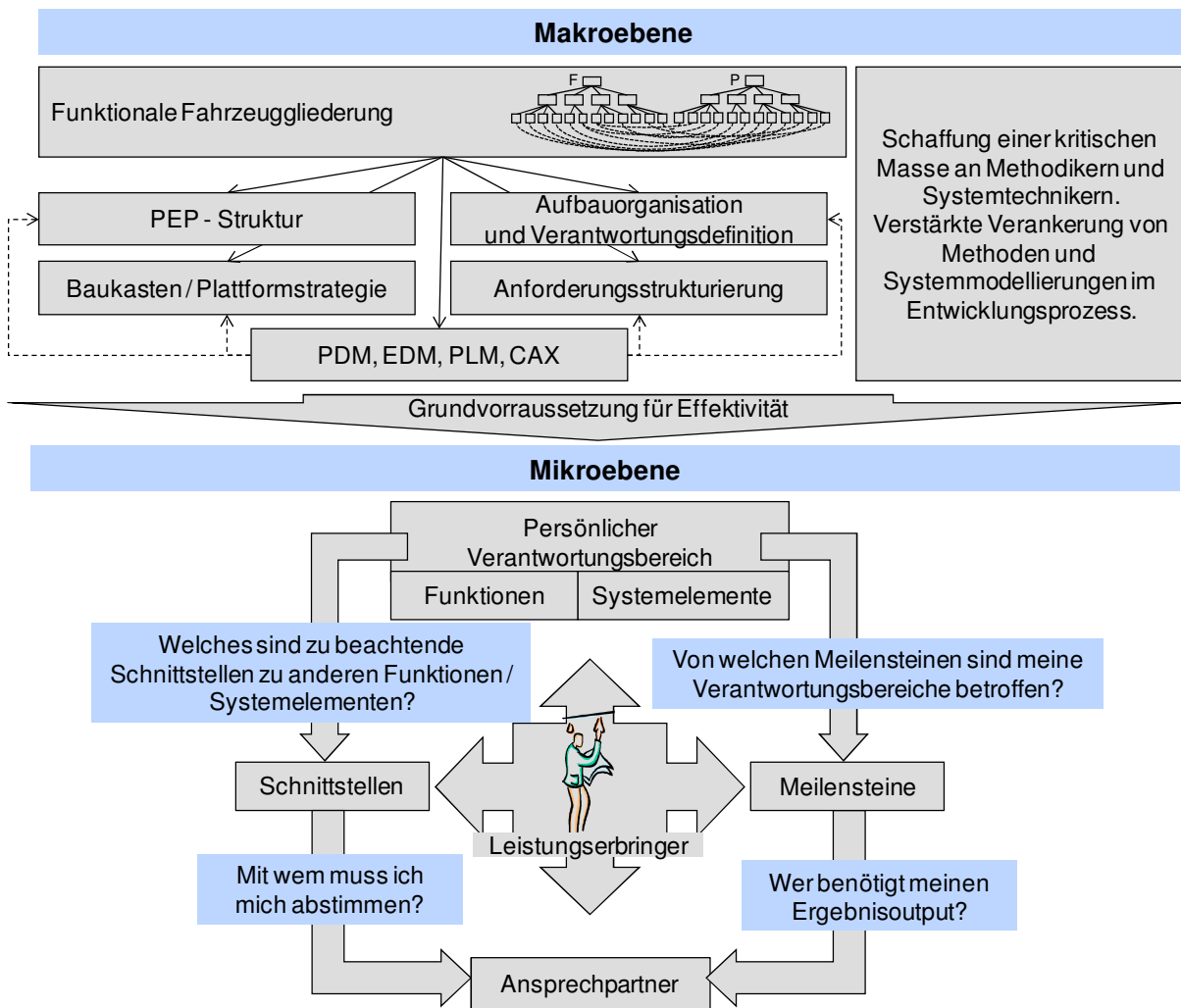


Abbildung 5-11: Handlungsbedarf auf Makro- und Mikroebene

Die Mikroebene stellt der einzelne Mitarbeiter als Leistungserbringer in einem komplexen Umfeld aus Prozess, Organisation und Produkt dar. Der Leistungserbringer erfährt bis dato zu wenig komplexitätsreduzierende Unterstützung bei seiner Arbeit im operativen Alltagsgeschäft (vgl. Kapitel 3.3.5) [vgl. MÖHRINGER 2005]. Die untere Grafik in Abbildung 5-11 soll die wichtigsten Fragestellungen des einzelnen Mitarbeiters verdeutlichen.

Der jeweilige Leistungserbringer ist assoziiert mit einem persönlichen Verantwortungsbereich aus Funktionen und funktionsrealisierenden Systemelementen. Diese stehen produktseitig in diversen Wechselwirkungen mit anderen Funktionen und anderen Systemelementen. Die Kenntnis der wichtigsten disziplinübergreifenden Wechselwirkung ist insbesondere bei Änderungen von enormer Bedeutung. Um das Bewusstsein hierfür zu schaffen, muss die Kultur des Abteilungsdenkens abgelöst werden durch eine integrative Herangehensweise [EHRENSPIEL 2007, S. 186]. Hilfreich für die Schaffung eines disziplinübergreifenden

System- und Problemverständnisses ist die gemeinsame Anwendung von Methoden und Modellierungstechniken sowie die gemeinsame Ausführung von Entwicklungsaktivitäten, wie beispielsweise dem Testen von Modulen oder dem gemeinsamen Vorbereiten von Versuchen. Weitere Unterstützung können geeignete Darstellungswerkzeuge bieten, die die erkannten und abgeleiteten multidimensionalen Abhängigkeiten transparent visualisieren. Bis dato mangelt es jedoch an geeigneten Darstellungsmethoden, die diese Wechselwirkungen domänenübergreifend transparent aufzeigen. Da die Entwicklungsarbeit viel Abstimmungsbedarf mit sich bringt, sollte zusätzlich ein schneller und transparenter Zugriff auf funktions- und systemelementbezogene Ansprechpartner ermöglicht werden. Zusammenfassend besteht somit ein erheblicher Bedarf die zentralen Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Bereichen Funktionen, Systemelemente und Personen integrativ darzustellen.

Auf der prozessoralen Seite erschweren die wenig integrativen domänenspezifischen Prozessdarstellungen eine Übersicht, von wem, welche Entwicklungsinhalte, zu welchem Zeitpunkt benötigt werden. Die domänenspezifische Entwicklungskultur wird hierdurch verstärkt. Für den einzelnen Entwickler muss somit transparenter dargestellt werden, von welchen Meilensteinen sein Verantwortungsbereich betroffen ist und wer welche Entwicklungsinhalte benötigt. Hierzu ist eine stärkere Berücksichtigung der Produktstruktur notwendig. So sollte auch die Prozessdarstellung stärker funktional geprägt sein als bisher.

Zusammenfassend besteht somit ein erheblicher Bedarf für eine integrierte Darstellung des mechatronischen Systems und seiner Abhängigkeiten zur Verbesserung des interdisziplinären Systemverständnisses sowie zur Gestaltung eines integrierten Prozesses. Welche Betrachtungsbereiche dabei von besonderer Bedeutung sind, wird im folgenden Kapitel diskutiert.

Neben den angesprochenen Problemen bei der Entwicklung mechatronisch geprägter Automobile müssen die großen Automobilhersteller weitere Herausforderung bewältigen. Hierzu zählen insbesondere die durch den anhaltenden Trend zum Käufermarkt und der damit verbunden Diversifikation verursachte Variantenvielfalt [SCHUH & SCHWENK 2001] sowie die Zusammenarbeit mit den zahlreichen Zulieferern. BULLINGER ET AL. diskutieren die einzelnen Chancen und Risiken der Automobilentwicklung auf Basis einer in der Automobilindustrie durchgeführten Studie [BULLINGER ET AL. 2003]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese Herausforderungen jedoch nicht näher behandelt.

6 Übersicht der Lösungsansätze

In Kapitel 5 wurden die durch den gestiegenen Anteil an Mechatronik und die damit verbundene Interdisziplinarität verursachten Herausforderungen im Entwicklungsprozess von Automobilsystemen aufgezeigt. Die geschilderten Herausforderungen beziehen sich auf die Serienentwicklung und zeigen auf, dass bestehende Strukturen in Prozess und Aufbauorganisation die dringend notwendige Integration der einzelnen Disziplinen zu wenig fördern. Zusätzlich mangelt es an geeigneten Werkzeugen zur transparenten Darstellung zentraler Abhängigkeiten und somit zur Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses. Die geschilderten Herausforderungen bedürfen sowohl struktureller Maßnahmen auf Unternehmensebene als auch unterstützender Elemente auf der Mikroebene des einzelnen Mitarbeiters im operativen Alltag. In den nachstehenden Kapiteln erfolgt eine Fokussierung der Lösungsentwicklung auf die Erarbeitung und Visualisierung zentraler Abhängigkeiten zwischen Funktionen, Systemelementen und Verantwortlichen (Personen) sowie auf die Ableitung integrationsbezogener Kommunikationsteams.

6.1 Abbildung und Visualisierung eines integrierten Produktmodells

Wie aufgezeigt wurde, besteht im operativen Geschehen der Serienentwicklung ein erheblicher Mangel bei der Unterstützung des einzelnen Mitarbeiters in Bezug auf die transparente Darstellung domänen- und disziplinübergreifender Abhängigkeiten zur Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses sowie der interdisziplinären Kommunikation. Dies betrifft insbesondere die Vernetzung von Funktionen und Systemelementen entsprechend den konträren Denkweisen der einzelnen Disziplinen und die damit verbundenen Verantwortungsstrukturen. Zudem werden Methoden und Systemmodellierungen zur Förderung eines interdisziplinären Systemverständnisses zu wenig eingesetzt.

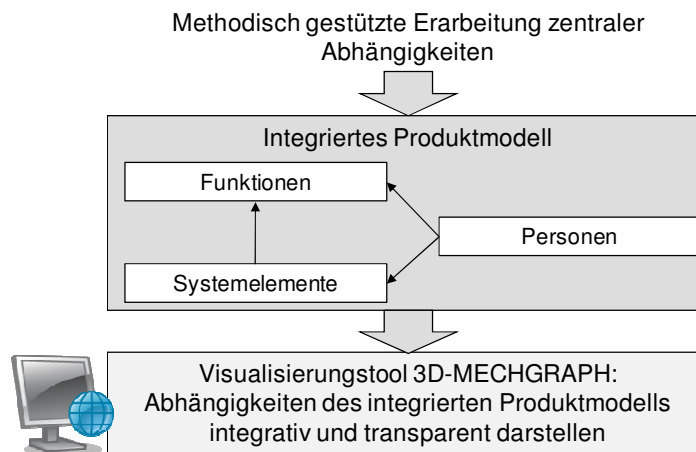


Abbildung 6-1: Vernetzungsdomänen des integrierten Produktmodells

Aus diesem Grund soll ein methodisch gestütztes Vorgehen zur Erarbeitung eines integrierten Produktmodells, das die Vernetzung zwischen und innerhalb der Domänen Funktionen, Systemelemente und Personen (Verantwortlichkeiten) abbildet, aufgezeigt werden. Das Produktmodell soll abbilden, welche Systemelemente (Komponenten) der Realisierung welcher Funktionen dienen und darstellen, welche Personen für welche Systemelemente und Funktionen verantwortlich oder an deren Erstellung beteiligt sind. Da die methodische Erarbeitung der Abhängigkeiten des integrierten Produktmodells zwar das interdisziplinäre Systemverständnis fördert, jedoch die verwendeten Systemmodellierungstechniken für die weitere Verwendung im operativen Alltag zu unübersichtlich sind, sollen die dort abgebildeten Abhängigkeiten mit Hilfe eines geeigneten Tools transparent visualisiert werden. Ziel ist es, einen Darstellungsansatz zu generieren, der die erarbeiteten Abhängigkeiten integrativ darstellt und hierdurch das gemeinsame Systemverständnis stärkt sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützt.

6.2 Weiterführende Konzepte zur funktionsorientierten Integration

Der zweite Schwerpunkt der Lösungsentwicklung liegt auf der Entwicklung eines funktionsorientierten Integrationsmodells, das sich an funktionsbezogenen Absicherungsaktivitäten als zentrale Fixsterne im Prozess ausrichtet und hierfür notwendige interdisziplinäre Kommunikationsstrukturen aus dem integrierten Produktmodell ableitet. Das funktionsorientierte Integrationsmodell soll disziplinübergreifend aufzeigen: welche Entwicklungsergebnisse, von wem, zu welchem Zeitpunkt, für welche funktionsbezogenen Absicherungsaktivitäten benötigt werden und wer daher miteinander vor und nach diesen Absicherungsaktivitäten kommunizieren sollte. Der Entwicklungsprozess wird hierzu als stufenweiser Prozess zur Realisierung von Kundenfunktionen betrachtet. Dies soll mit folgender Abbildung verdeutlicht werden.

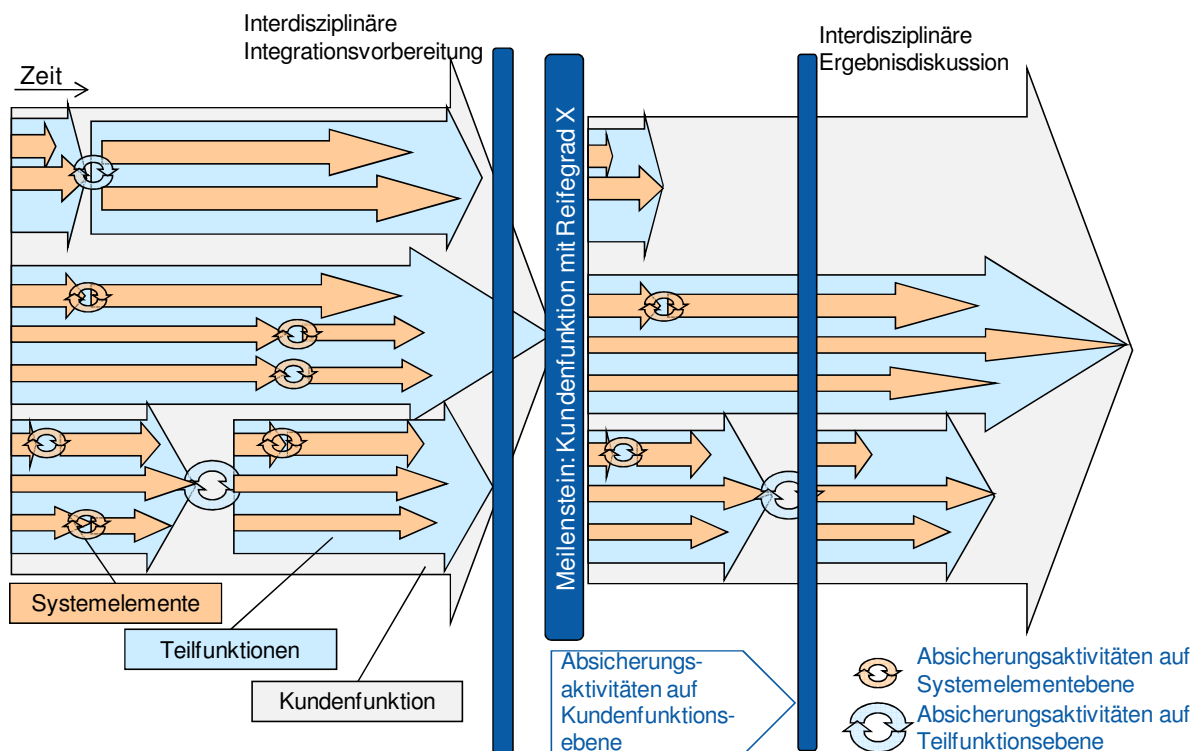


Abbildung 6-2: Entwicklung von Kundenfunktionen

Ausgehend von dem Leitgedanken, dass die Entwicklung der Realisierung von Kundenfunktionen dient, stellt die Grafik in Form der größten Pfeile die stufenweise Entwicklung dieser Funktionen dar. Um die Kundenfunktionen zu realisieren, müssen auf untergeordneter Ebene entsprechende Voraussetzungen geschaffen werden. Somit finden sich eine Hierarchieebene unter den Kundenfunktionen Pfeile, die die Realisierung von Teilfunktionen darstellen. Diese wiederum werden auf Elementarebene durch Systemelemente realisiert. Auf allen dargestellten Ebenen sind Absicherungsaktivitäten zur Überprüfung entsprechender Funktionsumfänge in Form von Meilensteinen vorgesehen.

Wie in Kapitel 5.2 aufgezeigt, bestehen häufig erhebliche Probleme bei der reibungslosen Zusammenführung der einzelnen Entwicklungsaktivitäten zu den absicherungsbezogenen Meilensteinen. Dies ist meist dadurch bedingt, dass nicht bekannt ist, welche Funktionen beziehungsweise Systemelemente von wem verantwortet werden, wer welche Funktionen beziehungsweise Systemelemente mit welcher Reife zu welchem Zeitpunkt für welche Absicherungsaktivität benötigt und wer daher vor und nach den Absicherungsaktivitäten miteinander kommunizieren sollte. Um für diese Herausforderung eine methodische Unterstützung zu bieten, werden in Kapitel 9.2.2 die Abhängigkeiten zwischen Funktionen, Systemelementen und Personen (Verantwortliche), die im integrierten Produktmodell (siehe Kapitel 6.1) abgebildet sind, mit Absicherungsaktivitäten verknüpft. Hieraus werden dann den Absicherungen vor- und nachgelagerte Kommunikationsteams (Integrations- und

Reflektionsteams) abgeleitet. Auf die Verknüpfung des Betrachtungsbereichs der Eigenschaftsanforderungen mit den bereits genannten Bereichen wird im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande eingegangen. Für eine intensivere Behandlung dieses Aspekts sei auf die Arbeit von HERFELD verwiesen, der sich in Bezug auf die Integration von Berechnung und Simulation intensiv mit der Vernetzung von Bauteilen und Eigenschaften auseinandersetzt [HERFELD 2007].

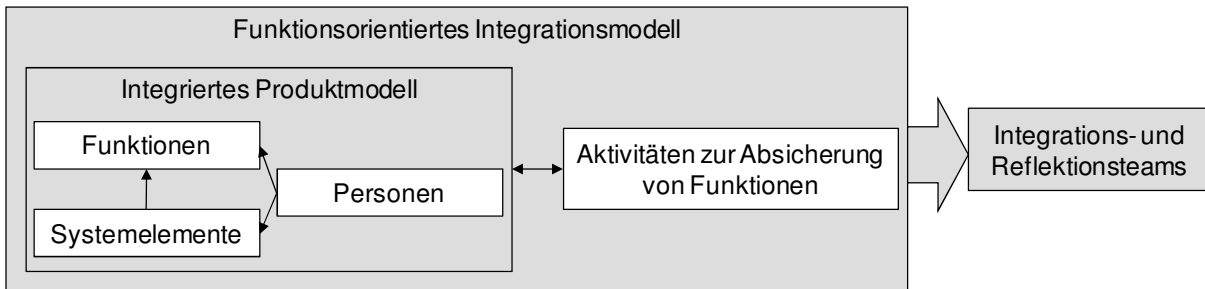


Abbildung 6-3: Vernetzung von Absicherungsaktivitäten und integriertem Produktmodell

6.3 Quellen für benötigte Abhängigkeitsinformationen

Für die Gewinnung der benötigten Abhängigkeitsinformationen des integrierten Produktmodells sowie des funktionsorientierten Integrationsmodells können verschiedene Quellen einzeln oder in Kombination dienen. Die Wahl der Quellen hängt zum einen von deren Verfügbarkeit sowie dem notwendigen Aufwand der Informationsgewinnung, zum anderen vom zeitlichen Horizont der Analyse ab. Sollen die gleichen Abhängigkeitsbereiche für jedes Entwicklungsprojekt neu erhoben werden, ist eine andere Lösungsentwicklung notwendig, als wenn es sich um ein einmaliges Analyseprojekt handelt. Zusätzlich ist die benötigte Aktualität der Daten von entscheidender Bedeutung, ob eine softwaretechnische Lösung angestrebt werden sollte oder pragmatischere Ansätze ausreichen.

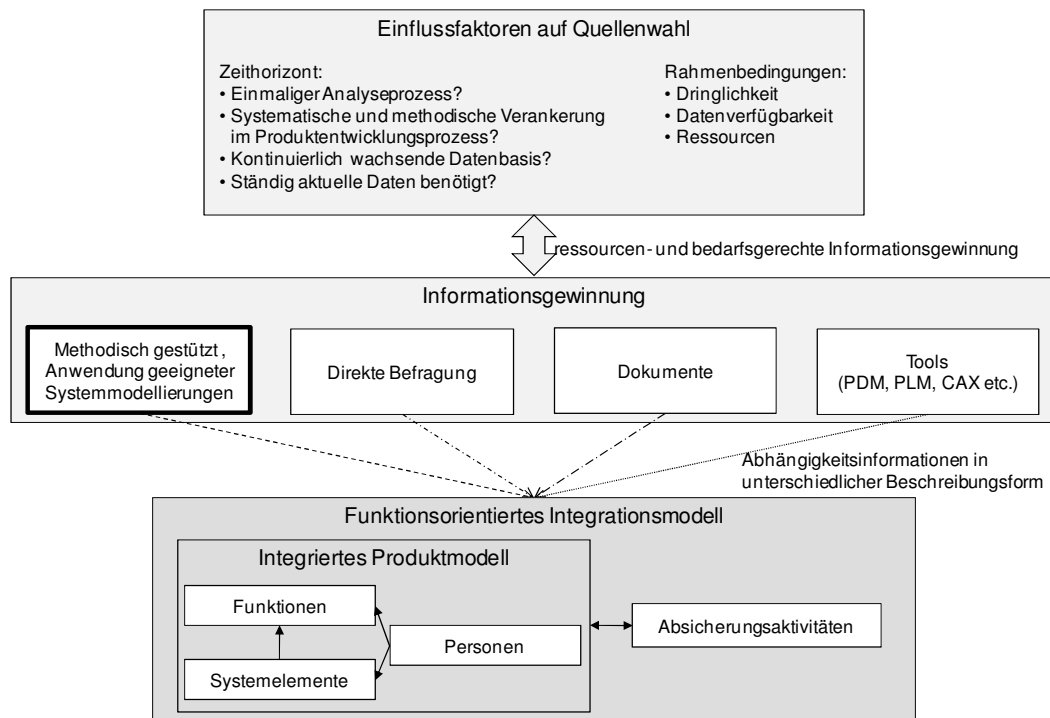


Abbildung 6-4: Gewinnung der zentralen Abhängigkeitsinformationen: Quellenwahl

Sinnvoll ist es, zunächst Abhängigkeitsinformationen zu identifizieren, die ohne zeitintensive Einbeziehung von Unternehmensmitarbeitern abgeleitet werden können. Hierfür muss überprüft werden, ob die benötigten Informationen bereits in Form von Dokumenten vorliegen oder aufwandsarm aus Tools abgeleitet werden können. Unter Umständen kann auch durch die Programmierung neuer oder die Nutzung bestehender Softwareschnittstellen erheblich Aufwand reduziert werden. So können beispielsweise Schnittstelleninformationen häufig aus den geometrischen Produktdaten von CAD-Systemen in Kombination mit den Stammdaten abgeleitet werden [HERFELD 2007]. Geometrische Schnittstellen können darüber hinaus auch durch Kollisionsanalysen in CAD-Systemen abgeleitet werden. Die softwaregestützte Erhebung ist insbesondere dann sinnvoll, wenn umfangreiche Abhängigkeitsinformationen wiederkehrend benötigt werden und weitgehend aktuell gehalten werden müssen. Aufwand und Nutzen derartiger informationsgewinnender Maßnahmen müssen unter Berücksichtigung von Bedarf und Ressourcen bewertet werden. Ist eine automatisierte Ableitung von Informationen aus Softwaresystemen nicht möglich oder sinnvoll und liegen die benötigten Informationen nicht in ausreichendem Maße in Form von Dokumenten bereits vor, können entweder Mitarbeiter direkt nach Abhängigkeiten befragt werden oder Abhängigkeiten mit Hilfe von geeigneten Ablauf- und Systemmodellierungstechniken erarbeitet werden.

Bei Anwendung von Methoden und Systemmodellierungstechniken im interdisziplinären Team steigt typischer Weise das gemeinsame System- und Problemverständnis und damit die

Ergebnisqualität in Bezug auf die generierten Abhängigkeitsdaten. Aus den erstellten Modellen lassen sich die benötigten Abhängigkeitsinformationen erheblich leichter ableiten, als wenn verschiedene Mitarbeiter direkt befragt würden. Meist hängt es stark von den methodischen Kenntnissen des Moderators ab, welche Methoden angewandt werden. Hilfreich ist es jedoch, wenn die angewandten Methoden die beteiligten Mitarbeiter nicht durch eine zu große Anwendungs- und Durchführungskomplexität überfordern. Der verantwortliche Moderator ist diesbezüglich als methodische Kompetenz gefordert. Workshops müssen daher gut vorbereitet und Methoden bedarfsgerecht angepasst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine methodisch gestützte Abhängigkeitsaufnahme angewandt. Die verwendeten Methoden haben sich in verschiedenen Projekten bewährt, sollen jedoch keine absolute Vorgabe darstellen. Die Anwendung abweichender Methoden kann situationsspezifisch sinnvoll und notwendig sein. Da die durch die Anwendung der unterschiedlichen Methoden generierten Abhängigkeitsinformationen stark unterschiedliche Beschreibungsformen aufweisen, ist in Bezug auf die Abhängigkeitsvisualisierung und das funktionsorientierte Integrationsmodell eine aggregierende und vereinheitlichende Methode von Nöten. Hierfür wird auf die durch MAURER entwickelte MDM-Methodik zurückgegriffen [MAURER 2007] (vgl. Kapitel 3.2.4).

7 Integriertes Produktmodell

Die folgenden Teilkapitel beschreiben am Beispiel der Entwicklung des komfortablen Einstiegssystems (siehe Kapitel 1.2) die methodisch gestützte Aufnahme und Abbildung der interdisziplinären Abhängigkeiten zwischen den Domänen Funktionen (Funktionssicht), Systemelementen (Bauteilsicht) und Personen (Verantwortungssicht) zur Erhöhung der Transparenz im mechatronisch geprägten Serienentwicklungsprozess. Die merkmalsorientierte beziehungsweise eigenschaftsorientierte Sicht stellt einen weiteren wichtigen Aspekt der interdisziplinären Entwicklung dar. HERFELD und KLEEDÖRFER beschäftigen sich daher intensiv mit der Bildung eigenschaftsorientierter Entwicklungsteams [HERFELD 2007], [KLEEDÖRFER 1999]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Eigenschaftssicht nicht näher behandelt. Im Vordergrund steht die funktionsorientierte Sicht und somit die Entwicklung von Kundenfunktionen. Es sei jedoch betont, dass die Automobilhersteller für eine optimale Gestaltung des Entwicklungsprozesses alle Sichten in integraler Weise berücksichtigen müssen.

Das im Folgenden beschriebene methodische Vorgehen zur Zerlegung der Funktionen in Teilfunktionen und die Zuordnung von Systemelementen orientiert sich an der VDI-Richtlinie 2206 (siehe Kapitel 3.3.4). Die durch die Anwendung der vorgeschlagenen Methoden erarbeiteten Abhängigkeitsinformationen werden anschließend durch die Anwendung der MDM-Methodik nach MAURER [2007] vereinheitlicht und bilden die Basis für eine transparente Visualisierung der zentralen interdisziplinären Abhängigkeiten in Kapitel 8 sowie das funktionsorientierte Integrationsmodell (Kapitel 9). Zunächst erfolgt jedoch eine Klärung wichtiger Begriffe.

7.1 Begriffsklärung

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente der Produktarchitektur nach Abbildung 3-6 begrifflich abgegrenzt.

Funktion und Funktionsstruktur:

Im Rahmen dieser Arbeit wird als das zentrale Ziel des Entwicklungsprozesses die Realisierung von Kundenfunktionen im Sinne von Gesamtfunktionen angenommen. „Unter Funktion versteht man die lösungsneutrale Formulierung des gewollten Zwecks eines Produkts“ [EHRENSPIEL 2007, S. 396]. Eine Funktion wandelt eine Eingangsgröße in eine Ausgangsgröße. Als Größen werden durch [PAHL ET AL. 2005] sowie [RODENACKER 1991] Energie, Stoff und Signal angegeben. PAHL ET AL. detaillieren die Größen wie folgt [PAHL ET AL. 2005, S.41]:

- Energie: mechanische, thermische, elektrische, chemische, optische Energie, Kernenergie, aber auch Kraft, Strom, Wärme ...

- Stoff: Gas, Flüssigkeit, feste Körper, Staub, ..., aber auch Rohprodukt, Material, Prüfgegenstand, Behandlungsobjekt, Endprodukt, Bauteil, geprüfter oder behandelter Gegenstand
- Signal: Messgröße, Anzeige, Steuerimpuls, Daten, Informationen...

Die zu entwickelnde Gesamtfunktion lässt sich in Teilfunktionen unterteilen. Um Lösungselemente für die Realisierung der Gesamtfunktion identifizieren zu können, wird in der Literatur allgemein die stufenweise Zerlegung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen empfohlen [PAHL ET AL. 2005 41FF], [EHRENSPIEL 2007, S. 395FF], [PONN & LINDEMANN 2008, S. 58 FF], [GÖPFERT 1998 S.93], [VDI 2004] [KALLMEYER 1998], [HUBER 2001], [GEHRKE 2005], [VDI 2004], [REINHART ET AL 2005]. Der hierarchische Aspekt der funktionalen Dekomposition der Gesamtfunktion in Teilfunktionen wird typischer Weise in einer Funktionshierarchie abgebildet. Durch die Hierarchisierung erfolgt bereits eine erste Reduktion der Komplexität der Entwicklungsaufgabe [GÖPFERT 1998, S.121]. Die Beschreibung einer Funktion erfolgt durch die Kombination „von Haupt- Zeitwort“ [PAHL ET AL. 2005, S. 42] beziehungsweise Substantiv plus Verb [LINDEMANN 2007, S. 300] (z.B. „Kraft leiten“). Hierdurch ist eine lösungsneutrale Formulierung des Entwicklungsziels gewährleistet. Funktionen, die nichtmehr weiter sinnvoll zerlegt werden können und allgemein anwendbar sind, werden Elementarfunktionen genannt [EHRENSPIEL 2007, S.396]. Dies soll auch für die vorliegende Arbeit gelten. Jedoch wird von einer Sammlung vorformulierter Elementarfunktionen zur allgemeinen Anwendung abgesehen¹. Stattdessen wird eine stark lösungsorientierte Formulierung zur besseren Nachvollziehbarkeit angewandt. Dies ist legitim, da sich der Ansatz auf die Serienentwicklung konzentriert und somit bereits die Realisierung einer konkreten Lösung angestrebt wird.

EHRENSPIEL unterscheidet zusätzlich zwischen Zweck- und Störfunktionen [EHRENSPIEL 2007 S. 395]. Störfunktionen sind ungewollt und durch entsprechende Vorkehrungen zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit werden wo nötig die alternativen Begriffe nützliche und schädliche Funktion verwendet [LINDEMANN 2007, S. 119]. Der entsprechende relationale Aspekt zwischen nützlichen und Schädlichen Funktionen kann beispielsweise in einem relationsorientierten Funktionsmodell abgebildet werden.

Darüber hinaus wird im Folgenden der Begriff Hilfsfunktion verwendet. Hilfsfunktionen dienen nicht direkt der Realisierung der Gesamtfunktion, sondern werden benötigt, um das Funktionieren eines Lösungselementes zu ermöglichen [PAHL ET AL. 2005, S. 43], [EHRENSPIEL 2007, S. 396], [GEHRKE 2005, S.49]. Beispiel für eine Hilfsfunktion ist „Energie bereitstellen“ für einen Elektromotor.

Allgemein werden Funktionen zu den mittelbaren Produktmerkmalen gezählt. Das heißt, dass der Entwickler Funktionen nur indirekt über die Gestaltung der sogenannten

¹ EHRENSPIEL gibt für die Elementarfunktionen die Elementaroperationen „leiten“, „ändern“, „wandeln“, „vereinigen“, „speichern“ an, betont jedoch, dass in der Praxis auf Grund der besseren Verständlichkeit eher technische Operationsbegriffe verwendet werden (z.B. zu- und abführen, tragen, transportieren, lagern, übertragen, dichten, schalten anstatt des allgemeinen Elementaroperationsbegriffes „leiten“) [EHRENSPIEL 2007, S.711]

Beschaffenheitsmerkmalen wie zum Beispiel Form, Anzahl oder Werkstoff festlegen kann [EHRENSPIEL 2007, S. 29F], [LINDEMANN 2007, S.158].

Baustruktur:

Nach GÖPFERT beschreibt die Baustruktur durch welchen „technisch, physischen Zusammenbau“ die Funktionen der Funktionsstruktur erfüllt werden [GÖPFERT 1998, S.74]. Da das Ziel der angesprochenen funktionalen Dekomposition die Zuordnung von Lösungselementen ist, hängt die funktionale Aufgliederungstiefe stark vom Neuigkeitsgrad der Entwicklung ab [GÖPFERT 1998, S.93], [VDI 2004]. Lösungselemente, die auf Ebene der Elementarfunktionen zugeordnet werden, erhalten in dieser Arbeit die Bezeichnung Systemelement. Der neutrale Begriff soll dem mechatronischen Charakter des Systems gerecht werden. Die einzelnen Typen von Systemelementen leiten sich somit aus der Definition eines mechatronischen Grundsystems ab (siehe Kapitel 2.1). Unterschieden werden daher in dieser Arbeit

- Sensoren,
- Aktoren,
- Steuergeräte,
- Software und
- mechanische Elemente.

Untereinander vernetzt sind die einzelnen Systemelemente durch verschiedene Schnittstellen. Typen von Schnittstellen sind insbesondere energetische, stoffliche und informationstechnische. Für die Darstellung dieser Vernetzung eignen sich insbesondere Wirkstrukturen (siehe Kapitel 3.2.3).

Die einzelnen Systemelemente werden in der Baustruktur im Sinne eines Bottom-Up Vorgehens wiederum zu logischen Baugruppen aggregiert und bilden in ihrer Summe das Gesamtprodukt. Die Anzahl der Baugruppenebenen ist nicht absolut vorgegeben. Neben Systemelementen wird der Begriff Einzelteil verwendet. Unter einem Einzelteil wird ein Bauteil des Produktes verstanden, dass sich nicht direkt aus der funktionalen Dekomposition sondern eher aus der Logik der Zusammensetzung einzelner Systemelemente beziehungsweise aus der Logik des Zusammenbaus der einzelnen Systemelemente ergibt. Dies kann beispielweise ein bestimmter Anschlussstecker eines Steuergerätes zum Anschluss an das Bordnetz oder eine Schraube zur Befestigung eines Steuergerätes an der Karosserie sein.

Ein Teilsystem soll in Bezug auf Absicherungsaktivitäten (siehe Kapitel 8.3.7) eine sinnvoll abprüfbare Teilmenge der Baustruktur bestehend aus mehr als einem Systemelement darstellen (siehe Kapitel 8.3.7). Das Gesamtsystem hingegen entspricht der kompletten Baustruktur.

7.2 Überblick der methodischen Abhängigkeitsaufnahme

In Abbildung 7-1 ist das durch den Autor vorgeschlagene methodisch gestützte Vorgehen zur Erarbeitung der interdisziplinären Abhängigkeitsinformationen dargestellt. Die zugehörige domänen- und disziplinübergreifende Visualisierung der Abhängigkeiten wird in Kapitel 8 beschrieben. Wie bereits in Kapitel 6.3 angedeutet, existieren verschiedenste Wege und Möglichkeiten, Abhängigkeitsinformationen zu identifizieren und aufzunehmen. So bestehen auch unterschiedliche Methoden, die sich eignen systemtechnische Vernetzungen zu erarbeiten. Das dargestellte methodische Vorgehen hat sich jedoch im betreuten Projekt bewährt, unter anderen Randbedingungen können auch alternative Methoden sinnvoll und notwendig sein.

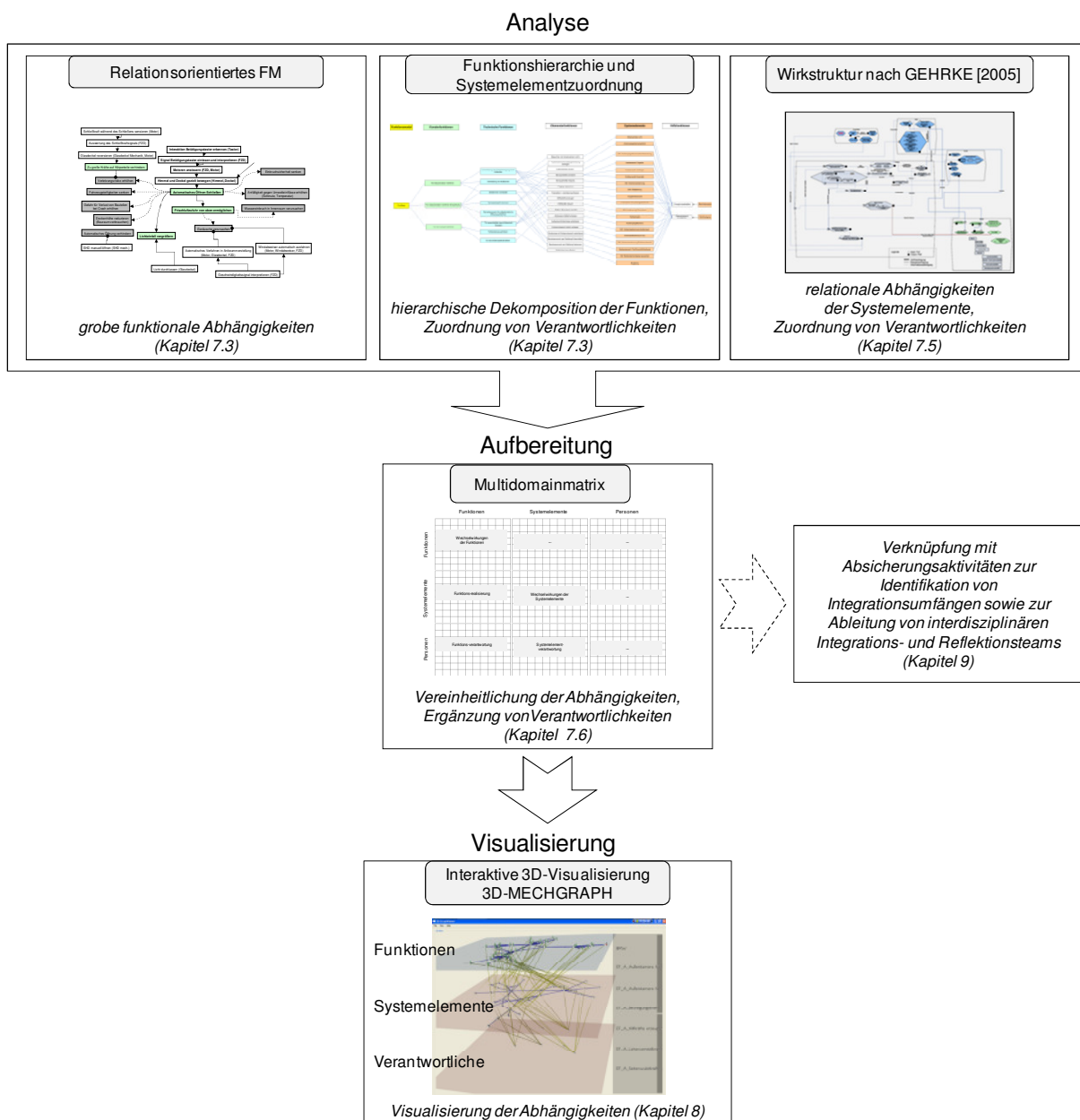


Abbildung 7-1: Methodisches Vorgehen zur Erarbeitung von Abhängigkeitsinformationen

Im Rahmen des abgebildeten Vorgehens kommt das Prinzip „*vom Groben zum Feinen*“ zur Anwendung. Somit wird zunächst die Erstellung eines groben relationsorientierten Funktionsmodells vorgesehen. Die Modellierungstechnik erlaubt die Darstellung von nützlichen und schädlichen Funktionen. Begonnen wird mit den zentralen nützlichen Funktionen von denen ausgehend dann zu deren Erfüllung benötigte Funktionen gesucht werden. Zusätzlich wird geprüft, welche schädlichen Funktionen entstehen und durch welche nützlichen Funktionen diese eventuell vermieden werden sollen [LINDEMANN 2007, S.119F]. Diese Modellierungstechnik unterstützt in sehr guter Weise einen ersten Einstieg in die Klärung des Entwicklungsziels aus funktionaler Sicht. So können sich die Beteiligten verdeutlichen, welches die zu entwickelnden Kundenfunktionen sind und wie der grobe relationale Zusammenhang der Funktionen aussieht.

Ausgehend von diesem groben Systemverständnis wird die Erstellung einer detaillierten Funktionshierarchie vorgeschlagen. Dies sieht die schrittweise Zerlegung der Hauptfunktionen bis auf die Ebene von Elementarfunktionen vor. Anschließend werden den Elementarfunktionen funktionsrealisierende Systemelemente zugeordnet. Durch diese Modellierung wird der hierarchische Systemaspekt aus funktionaler Sicht abgebildet (siehe Kapitel 7.3). Auf Seite der Baustruktur muss eine Aggregation der einzelnen Systemelemente und eventuell benötigter zusätzlicher Einzelteile zu Baugruppen erfolgen. Diese Strukturierung wird jedoch im Allgemeinen relativ gut beherrscht und bereits durch gängige PDM-Systeme gut unterstützt [WARKETIN & HERBST 2006]. Daher wird diese Tätigkeit nur am Rande behandelt.

Um die relationalen Aspekte des zu entwickelnden Systems zu detaillieren, bietet sich die Wirkstrukturmodellierungstechnik nach GEHRKE an [GEHRKE 2005]. Diese Modellierungstechnik ermöglicht sowohl die strukturierte Darstellung des hierarchischen Aspektes zwischen Baugruppen und deren Systemelementen als auch die Abbildung der energetischen, stofflichen und informationstechnischen Beziehungen der Baugruppen und Systemelemente untereinander. Hierauf wird genauer in Kapitel 7.5 eingegangen.

Im nächsten Schritt müssen die in den generierten Modellen enthaltenen Abhängigkeits- und Vernetzungsinformationen vereinheitlicht beziehungsweise „digitalisiert werden“, um diese anschließend domänenübergreifend visualisieren zu können. Hierfür wird eine Multidomänenmatrix erstellt. Die Matrix enthält die Domänen Funktionen, Systemelemente und Personen. Abgebildet wird, welche Systemelemente welche Funktionen realisieren, wie die Funktionen und Systemelemente untereinander vernetzt sind und wer welche Verantwortung für welche Funktionen und Systemelemente trägt beziehungsweise an deren Entwicklung beteiligt ist (siehe Kapitel 7.6). Die Visualisierung dieser komplexen Abhängigkeiten im Visualisierungstool 3D-MECHGRAPH (Kapitel 8) zielt auf eine Verbesserung des interdisziplinären Systemverständnisses sowie der interdisziplinären Kommunikation ab.

Die in der Multidomänenmatrix des integrierten Produktmodells abgebildeten Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Bereichen Funktionen, Systemelemente und Personen werden in Kapitel 9 wiederum aufgegriffen und mit Funktionsabsicherungsaktivitäten verknüpft. Hierdurch kann systematisch abgeleitet werden, welche Systemelemente für einen

Funktionsversuch benötigt werden (Integrationsumfänge) und wer im Versuchsrahmen miteinander kommunizieren sollte (Integrations- und Reflektionsteams).

In den folgenden Kapiteln werden nun die angesprochenen Schritte der methodischen Abhängigkeitsaufnahme an einem praktischen Beispiel genauer erläutert.

7.3 Funktionale Dekomposition am Beispiel komfortables Einsteigen

Im Rahmen des Kooperationsprojektes CAR@TUM zwischen der BMW Group und der TU-München wurde in einem interdisziplinären Team aus mehreren Lehrstühlen ein Konzept für die Verbesserung des Einsteigekomforts erarbeitet. Hierbei wurden insbesondere Konzepte für eine voll- und teilautomatisierte Öffnung einer Tür mit mehreren Freiheitsgraden erarbeitet. Teilautomatisiert bedeutet dabei eine Erkennung der gewünschten Öffnungsbewegung des Nutzers und eine darauf angepasste Kraftunterstützung zur Reduktion der notwendigen Interaktionskräfte. Dieser Ansatz stellt somit eine erhebliche Erweiterung des in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Comfort Access Systems dar. Nachvollziehbarer Weise ist für die Umsetzung eines solchen Systems eine umfangreiche Steuer- und Regelungsauslegung notwendig. Dies betrifft insbesondere sicherheitskritische Bereiche wie den Einklemmschutz und die Vermeidung von Kollisionen der sich öffnenden Tür mit sich bewegenden oder stehenden Hindernissen. Das System muss folgerichtig mit einem umfangreichen Sensorsystem sowohl zur Umfeld- und Innenraumerkennung als auch zur Sensierung der Benutzerwünsche ausgestattet sein.

Da es sich bei dem Projekt um eine Forschungs- und Entwicklungsprojekt handelte, musste zunächst ein gemeinsames Systemverständnis erarbeiten werden. Dies betrifft die Definition der prinzipiell zu entwickelnden Funktionsweise und damit die Identifizierung der zu realisierenden primären Kundenfunktionen. Hierfür wurden auf Basis intensiver Recherchetätigkeiten und praktischer Versuche mit Vorgängerprodukten verschiedene strukturbezogene Funktionsmodelle erstellt. Die direkte Modellierung einer hierarchischen Funktionsstruktur hätte zu diesem Zeitpunkt das Team überfordert. Als vorbereitende Funktionsmodellierungstechniken wurden daher relationsorientierte Funktionsmodelle des aktuellen Einsteigeprozesses und des visionären-Zustandes generiert (siehe Abbildung 7-2). Die Abbildung des aktuellen Systems half dabei, Schwachstellen zu identifizieren und Verbesserungspotentiale abzuleiten. Durch die Möglichkeit der Modellierung von negativen beziehungsweise ungewünschten Funktionen wurde bei der Modellierung des zukünftigen Systems insbesondere eine intensive Reflektion sicherheitskritischer Bereiche ermöglicht. Hierdurch wurden notwendige Funktionen zur Vermeidung der negativen Funktionen identifiziert. Dies betrifft beispielsweise den Einklemmschutz oder die Kollisionserkennung. Auf der Basis dieser Aktivitäten konnten grobe Themenblöcke identifiziert werden und Aufgabenbereiche im interdisziplinären Team festgelegt werden. Dies beinhaltete ebenfalls die Festlegung grober Systembereiche, die zur Realisierung der gefundenen Funktionen entwickelt werden müssen. Beispiele hierfür sind:

- Entwicklung einer neuen Türkinematik zur Ermöglichung einer flexiblen Öffnungs-/Schließbewegung der Tür
- Entwicklung neuer Sensorsysteme zur Erfassung kritischer Hindernisse beim Öffnen-/Schließvorgang
- Entwicklung eines Sensorsystems zur Aufnahme des Benutzerwunsches
- Entwicklung von Steuer- und Regelungssystemen zur Verarbeitung der Sensorsignale und der darauf angepassten Ansteuerung der Türmotoren

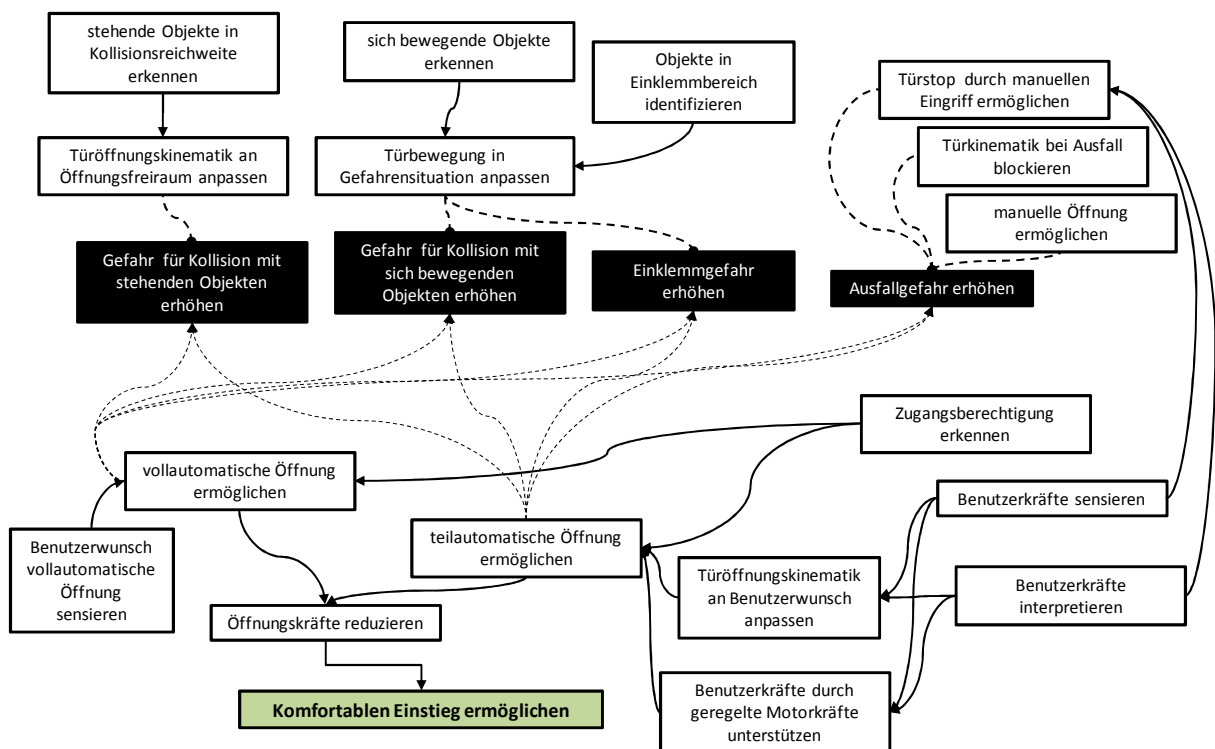


Abbildung 7-2: Ausschnitt einer möglichen relationsorientierten Funktionsstruktur für das neu zu entwickelnde Einstiegssystem

Erst mit fortgeschrittenem Systemverständnis konnte die Erstellung einer detaillierteren Funktionshierarchie und die anschließende Zuordnung von Systemelementen effektiv durchgeführt werden. Die Erarbeitung fand im interdisziplinären Team über mehrere Sitzungen hinweg statt. Die Modellierungswshops waren geprägt durch einen intensiven Reflektions- und Diskussionsprozess. Dabei diente die Methode als Katalysator, um das gemeinsame Systemverständnis weiter zu vertiefen. Zentrale Punkte der Diskussionen waren insbesondere:

- Welche unterschiedlichen Nutzerfälle müssen abgebildet werden

- Welche disziplinspezifischen Abläufe im Sinne von notwendigen Teilfunktionen sind zur Erfüllung der Kundenfunktionen notwendig

Insbesondere durch die Erläuterung der notwendigen Abläufe aus jeweils disziplinspezifischer Sicht wurde bei den Vertretern der anderen Disziplinen das Verständnis für disziplinfremde Probleme und die Vernetzung mit dem eigenen Verantwortungsbereich extrem erhöht.

Zur funktionalen Aufgliederung des Systems wurden folgende Abstraktionsebenen festgelegt:

- Funktionscluster
- Funktionsmodule
- Kundenfunktionen
- Teilfunktionen
- Elementarfunktionen

Auf oberster Abstraktionsebene stellen Funktionscluster eine funktionale Grundstrukturierung des Fahrzeugs dar. Die Funktionscluster sollten so definiert sein, dass sie marketinggerechte Funktionsblöcke widerspiegeln. Im vorliegenden Fall wurde das Funktionscluster „Komfortables Einsteigen und sicheres Sitzen“ betrachtet. Funktionscluster werden anschließend weiter in sogenannte Funktionsmodule unterteilt. Dies sind die Hauptnutzungsfälle, die den entsprechenden Funktionsclustern zuzuordnen sind. Beispiele des Funktionsclusters „Komfortables Einsteigen und sicheres Sitzen“ sind: „Tür öffnen“, „Tür schließen“ oder „Sitz für Einstieg“ anpassen. Jedes Funktionsmodul wird in Kundenfunktionen, Teilfunktionen und Elementarfunktionen untergliedert. Kundenfunktionen lassen sich im Sinne von Teilnutzungsfällen verstehen, die in Bezug auf den Hauptnutzungsfall eintreten können. Dies wird bei der Aufgliederung von „Tür öffnen“ in:

- „Tür vollautomatisch öffnen“,
- „Tür teilautomatisch öffnen“ und
- „Tür manuell öffnen“ deutlich.

Zur Realisierung dieser Kundenfunktionen werden technische Teilfunktionen benötigt. Eine eindeutige Definition für die Teilfunktionsebene zu liefern, ist nicht möglich, da sich deren Formulierung aus dem jeweiligen Kontext ergibt. Jedoch spiegeln sie funktionale Anforderungen wieder, die zur Erfüllung der Kundenfunktion benötigt werden. Dabei werden Teilfunktionen typischer Weise durch das Zusammenwirken mehrerer Systemelemente (Software, Elektrotechnik, Mechanik) realisiert. Systemabhängig kann die Einführung mehrerer Teilfunktionsebenen sinnvoll sein. Erst auf Elementarfunktionsebene ist in den meisten Fällen eine eindeutige Zuordnung von Systemelementen möglich. Auf dieser Stufe ist darauf zu achten, dass eine Elementarfunktion nicht durch mehr als ein Systemelement erfüllt wird. Sollte dies nicht der Fall sein, so hat es sich im betreuten Projekt bewährt die Formulierungen der Teilfunktionen und der zugehörigen Elementarfunktionen auf den richtigen Abstraktionsgrad hin zu überprüfen und diese gegebenenfalls anzupassen. Unter

Umständen kann es jedoch Abweichungen von dieser Regel geben, so dass eine Elementarfunktion durch mehr als ein Systemelement realisiert wird. Beispielsweise können die Benutzerkräfte bei der Türöffnung durch mehrere Sensoren, die an unterschiedlichen Stellen der Tür angebracht sind, kombiniert gemessen werden (Redundanz).

Auf Seite der Komponenten existieren häufig Systemelemente, die mehrere Funktionen übernehmen. Ist jedoch auch umgekehrt eine eindeutige Zuordnung möglich, so sind die Systemelemente funktional unabhängig [GÖPFERT 1998, S.105]². Wie dieser Beschreibung zu entnehmen, handelt es sich bei der Erstellung der Funktionshierarchie um ein iteratives Vorgehen. Wichtig ist, dass sich alle Beteiligten mit dem generierten Modell identifizieren und dass das Team das gemeinsame Systemverständnis in diesem Schritt vertieft. Falls möglich, können den einzelnen Gruppen der Funktionshierarchie und den Systemelementen bereits Verantwortliche und Bearbeiter zugeordnet werden (siehe Kapitel 7.6). Die Verantwortlichkeiten können textuell in den entsprechenden Kästchen der Funktionshierarchie vermerkt werden.

Einige Systemelemente benötigen die Erfüllung von Hilfsfunktionen (Kapitel 7.1). Ein Beispiel hierfür ist das „Bereitstellen von Energie“, welches Grundvoraussetzung für das Funktionieren von elektrischen Komponenten ist. Ein anderes Beispiel wäre „Informationsaustausch gewährleisten“ für die Kopplung von Sensoren, Aktoren und Steuergeräten (inklusive Software). Hilfsfunktionen sind somit unterstützende Funktionen, die das Systemelement zu dessen Funktionsweise benötigt [GEHRKE 2005, S.49, 66F]. GEHRKE ordnet die Hilfsfunktionen in der Funktionshierarchie direkt unter der Elementarfunktion an. Da ein Systemelement jedoch mehrere Elementarfunktionen erfüllen kann, wird in der vorliegenden Arbeit hiervon abweichend eine Zuordnung von Hilfsfunktionen zu den entsprechenden Systemelementen empfohlen. Für die Hilfsfunktionen kann eine entsprechende Verknüpfung mit einem zusätzlichen Systemelement, welches diese realisiert (z.B. Bordnetz für „Bereitstellen von Energie“), erfolgen. Um den Betrachtungsumfang zu begrenzen, wird anschließend jedoch in Abweichung zu GEHRKE von einer weiteren Zerlegung der Hilfsfunktion in weitere Hilfsfunktionen und der Zuordnung der jeweiligen benötigten zusätzlichen Systemelemente abgesehen. Hingegen wird für Systemelemente, die durch Hilfsfunktionen eingeführt wurden und einen entsprechend komplexen Teilsystemcharakter aufweisen, an dieser Stelle eher die Erstellung einer separaten Funktionsstruktur empfohlen. So zum Beispiel für das Bordnetz: Hauptfunktion: Energie bereitstellen; Teilfunktionen: Energie verteilen, Bordnetzspannung kontrollieren, usw.

Abbildung 7-3 verdeutlicht das beschriebene Vorgehen im Workshop am Beispiel des Funktionsmoduls „Tür öffnen“. Die beschriebene Anzahl an Hierarchieebenen und deren Benennung hat sich im Projekt bewährt. Je nach vorliegendem System beziehungsweise zu zergliedernder Funktion kann es jedoch sinnvoll und notwendig sein, mehr oder weniger Hierarchieebenen zu bilden. Das folgende Kapitel 7.4. beschreibt hierauf aufbauend die Vernetzung von Funktionshierarchie und Baustruktur.

² Sind die Systemelemente (bzw. Komponenten) darüber hinaus physisch unabhängig, so liegt eine modulare Produktarchitektur vor [GÖPFERT 1998, S.104]. Der gegenteilige Zustand (Systemelement sind funktional und physisch nicht unabhängig) entspricht einer integralen Bauweise [GÖPFERT 1998, S.110].

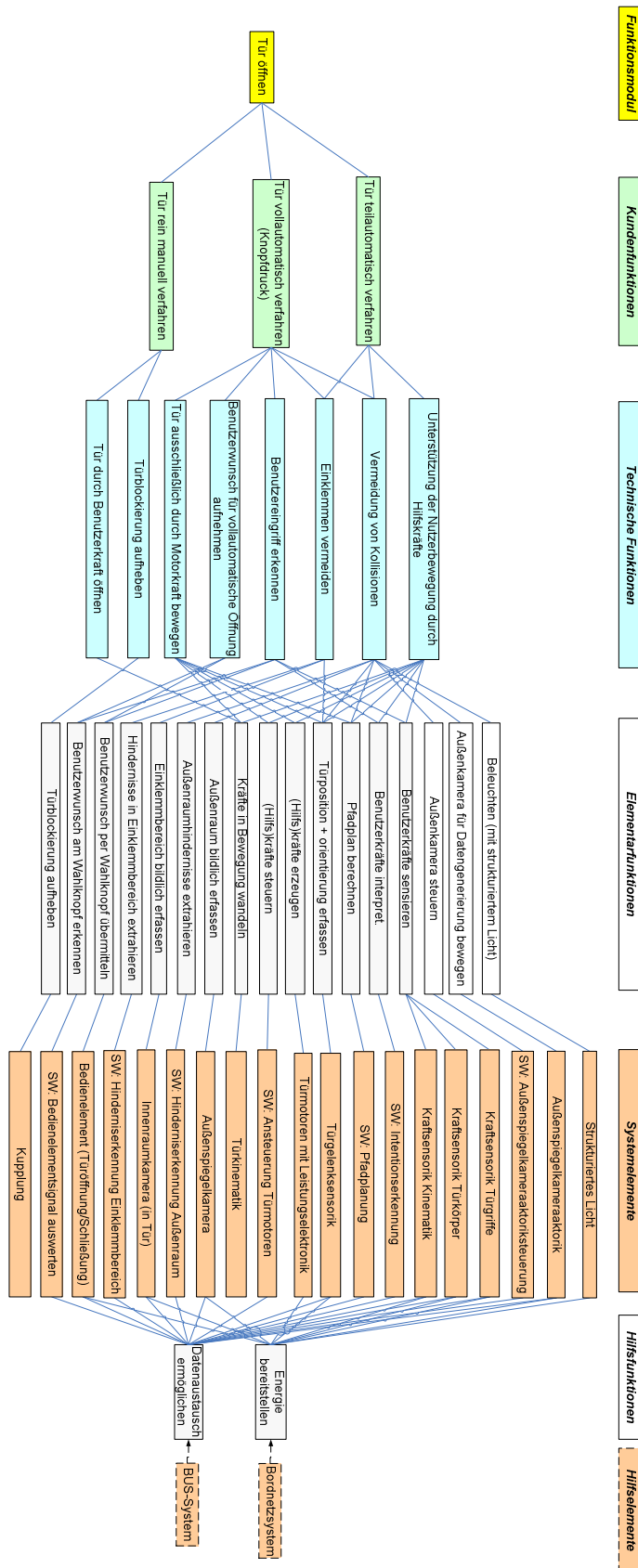


Abbildung 7-3: Ausschnitt der Funktionshierarchie mit zugeordneten Systemelementen

7.4 Vernetzung von Funktionshierarchie und Baustruktur

Wie in Kapitel 5.2 dargelegt, zeichnen sich mechatronische Systeme durch einen hohen Vernetzungsgrad aus. Der Grad der „örtlichen“ Verteilung kann je nach betrachteter Funktion (Teilfunktion, Kundenfunktion, Funktionsmodul oder Funktionscluster) erheblich oder nicht vorhanden sein. Er wird durch die Abbildungsfunktion der Elementarfunktionen auf die einzelnen Elemente der physisch orientierten Baustruktur definiert. Im Folgenden sollen daher in Bezug auf die Zuordnung zur physischen Baustruktur zwei unterschiedliche Kategorien von Funktionsumfängen unterschieden werden:

- Gekapselte Funktionen
- Verteilte Funktionen

Gekapselte Funktionen werden durch ein Gruppierungselement der physischen Baustruktur des Fahrzeugs repräsentiert. In diesem Fall nehmen die einzelnen Systemelemente der entsprechenden Baugruppe alle für die Realisierung des Funktionsumfangs notwendigen Teil- und Elementarfunktionen wahr. Abbildung 7-4 verdeutlicht die beschriebene Unterscheidung.

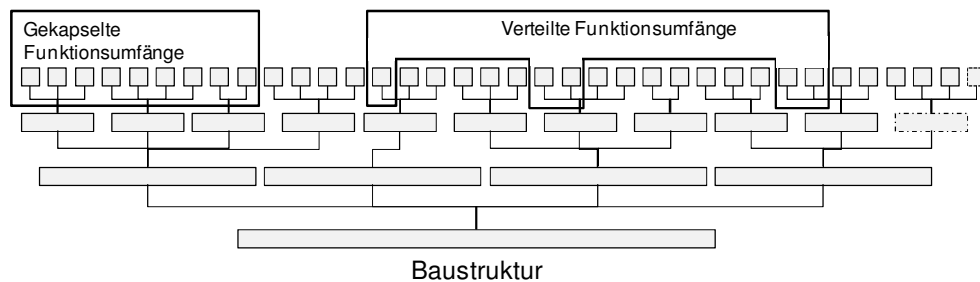


Abbildung 7-4: Gekapselte und verteilte Funktionen

Der Verteilungsgrad von Funktionen ist insbesondere in Bezug auf funktionsorientierte Absicherungsaktivitäten und der hierfür notwendigen Integrationsplanung von zentraler Bedeutung. So kann die Absicherung von stärker verteilten Funktionen einen deutlich höheren Integrationsaufwand erfordern als bei einer gekapselten Funktionseinheit. Dies ist ein entscheidender Punkt, der bei der Planung der funktionalen Absicherungen berücksichtigt werden muss³. Dieser Zusammenhang wird intensiver im Rahmen der Erstellung des funktionsorientierten Integrationsmodells diskutiert (siehe Kapitel 9.2). GÖPFERT führt als einen Vorteil von modularen Produktarchitekturen, bei denen die Baugruppen funktional und physisch unabhängig sind, die einfachere Funktionsprüfung auf, weist jedoch auf die Gefahr

³ Neben dem Verteilungsgrad einer Funktion bestimmen die Sicherheitskritikalität, Erfahrungswerte in Bezug auf Integrationsprobleme, Gewährleistungskennzahlen und Neuigkeitsgrad die zeitliche Versuchsplanung.[vgl. LÉVÁRDY ET AL 2004]. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

hin, dass eine alleinige Einzelkontrolle der Module nicht die Funktion des Gesamtproduktes garantiert [GÖPFERT 1998, S. 112ff].

Ausgehend von der geschilderten Vernetzung von Funktionshierarchie und Baustruktur geht das folgende Kapitel auf die relationalen Aspekte innerhalb der Bereiche Funktionen und Systemelemente ein.

7.5 Vernetzung innerhalb der Bereiche Funktionen und Systemelemente

Nach GÖPFERT [1998] sowie PAHL & BEITZ [2005] besitzen Funktionsstruktur und Baustruktur sowohl einen hierarchischen als auch einen strukturellen Charakter. Für die Vernetzung der Funktionen werden typischer Weise die Relationstypen Energie, Signal und Stoff verwendet [PAHL & BEITZ 2005, S 43; GEHRKE 2005 S.59]. Neben diesen eher umsatzorientierten Funktionsmodellen bestehen, wie in Kapitel 3.2.3 bereits dargestellt, weitere Modellierungstechniken wie das relationsorientierte Funktionsmodell.

In Bezug auf die Systemelemente können unterschiedlichste Vernetzungsaspekte herangezogen werden. Dies können beispielsweise Fragen des Package, die informationstechnische Vernetzung, die energetische Vernetzung oder auch Eigenschaftswchselwirkungen wie die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) oder die Wärmeleitung sein. Je nach Problemstellung und Analyseschwerpunkt rückt der eine oder der andere Aspekt in den Vordergrund. Eine vollständige Darstellung all dieser Beziehungen ist weder möglich noch sinnvoll [STEINMEIER 1998]. Abbildung 7-5 verdeutlicht die verschiedenen Wechselwirkungsaspekte am Beispiel Temperatur, EMV, Geometrie und Schnittstellen. Die im Folgenden geschilderte Aufnahme der Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen stellt daher nur einen von vielen möglichen Aspekten dar. Je nach Analyse und Interpretationsziel kann es somit sinnvoll sein andere oder mehrere Aspekte aufzunehmen.

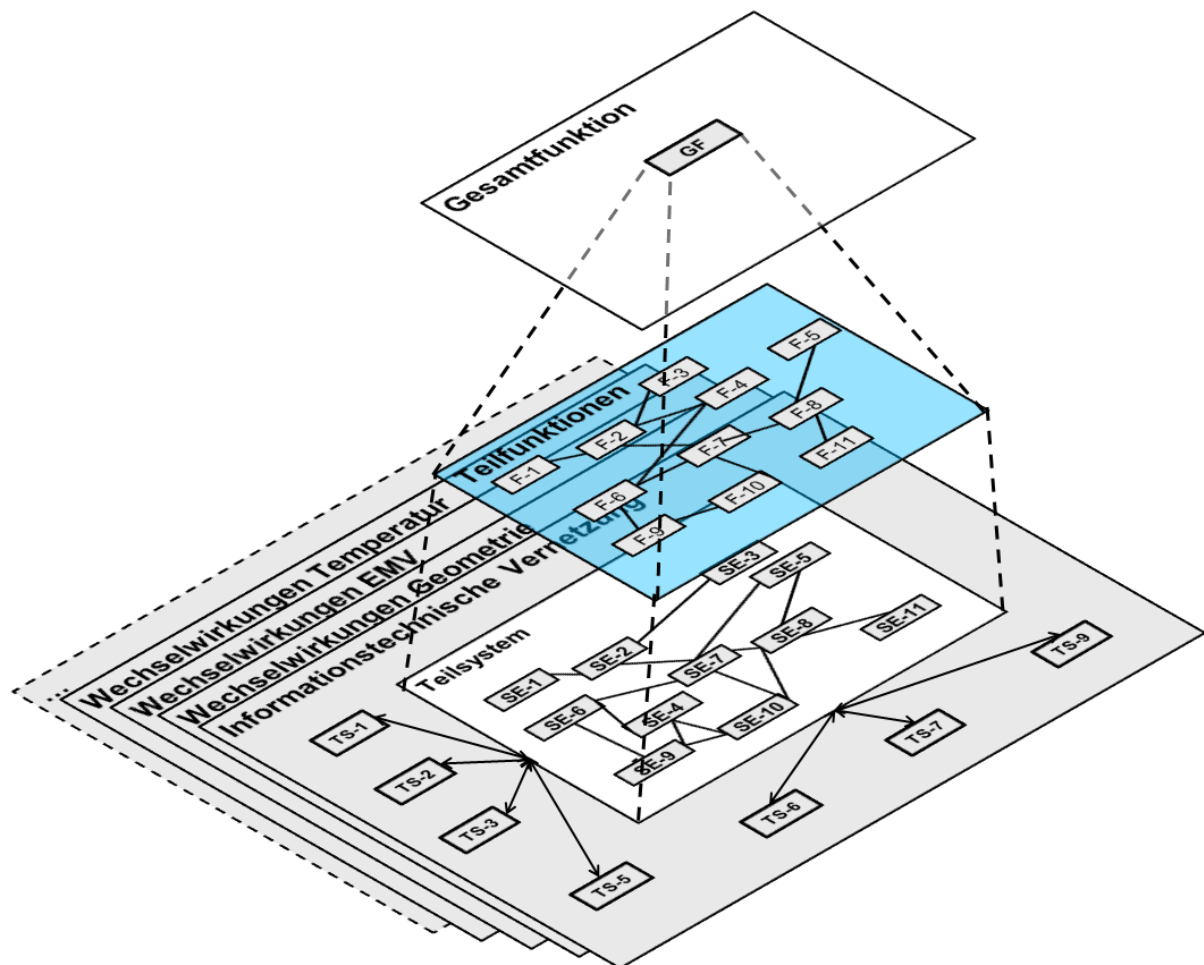


Abbildung 7-5: Vernetzungsaspekte eines Systems

Zur Abbildung der Vernetzung der Systemelemente wird die durch GEHRKE entwickelte Modellierungstechnik für den Entwurf mechatronischer Systeme [GEHRKE 2005] empfohlen. Die formalisierte Beschreibungstechnik stellt Systemelemente als liegende Sechsecke mit weißen Eingangs- und schwarzen Ausgangsports dar. Über diese Ports können Systemelemente mit Hilfe der Relationstypen Energie, Stoff und Information miteinander verbunden werden. Systemelemente können darüber hinaus gruppiert werden, um logische Einheiten oder Baugruppen darzustellen.

Abbildung 7-6 stellt einen Ausschnitt der im betreuten Projekt generierten Wirkstruktur des komfortablen Einstiegssystems dar. Zu sehen sind zentrale Softwaresystemelemente der Kameraauswertung sowie des ID-Gebers. Alle dargestellten Elemente sind auf Grund ihrer Disziplinzugehörigkeit über den Relationstyp Information verbunden. Das Gruppierungselement „Außenkameraauswertung“ enthält die Systemelemente „SW-Hinderniserkennung Außenraum“, „SW-Anthropometriedatenauswertung“ sowie „SW-Personenextraktion“ und bildet somit eine logische Einheit der Software aus stark

funktionaler Sicht. Gruppierungen erlauben es den Abstraktionsgrad der Darstellung gezielt zu erhöhen, in dem alle Teilsystemelemente der Außenraumkameraauswertung sowie alle innerhalb des Gruppierungssechsecks liegenden Relationen ausgeblendet und lediglich die Ein- und Ausgangsverbindungen der Gruppe dargestellt werden. GEHRKE [2005] hat für ein einfacheres Umschalten zwischen diesen Abstraktionsgraden eine softwaretechnische Lösung entwickelt, die jedoch im Rahmen des betreuten Projektes nicht vorlag.

Für eine bessere Lesbarkeit der Wirkstruktur können die einzelnen Relationen beschriftet werden. So ist beispielsweise zu erkennen, dass alle Elemente der Außenkameraauswertung Daten von der Außenkamera erhalten. Zentrale Motivation für den Einsatz der Modellierungstechnik war die einfache und gut nachvollziehbare Abbildung der Vernetzung der Systemelemente auf Basis der verschiedenen Relationstypen. Ebenso wie in der Funktionshierarchie lassen sich zusätzlich in den einzelnen Kästchen die Entwicklungsverantwortlichen beziehungsweise die Bearbeiter aufnehmen und festhalten. Im abgebildeten Fall sind diese jeweils in eckigen Klammern angegeben.

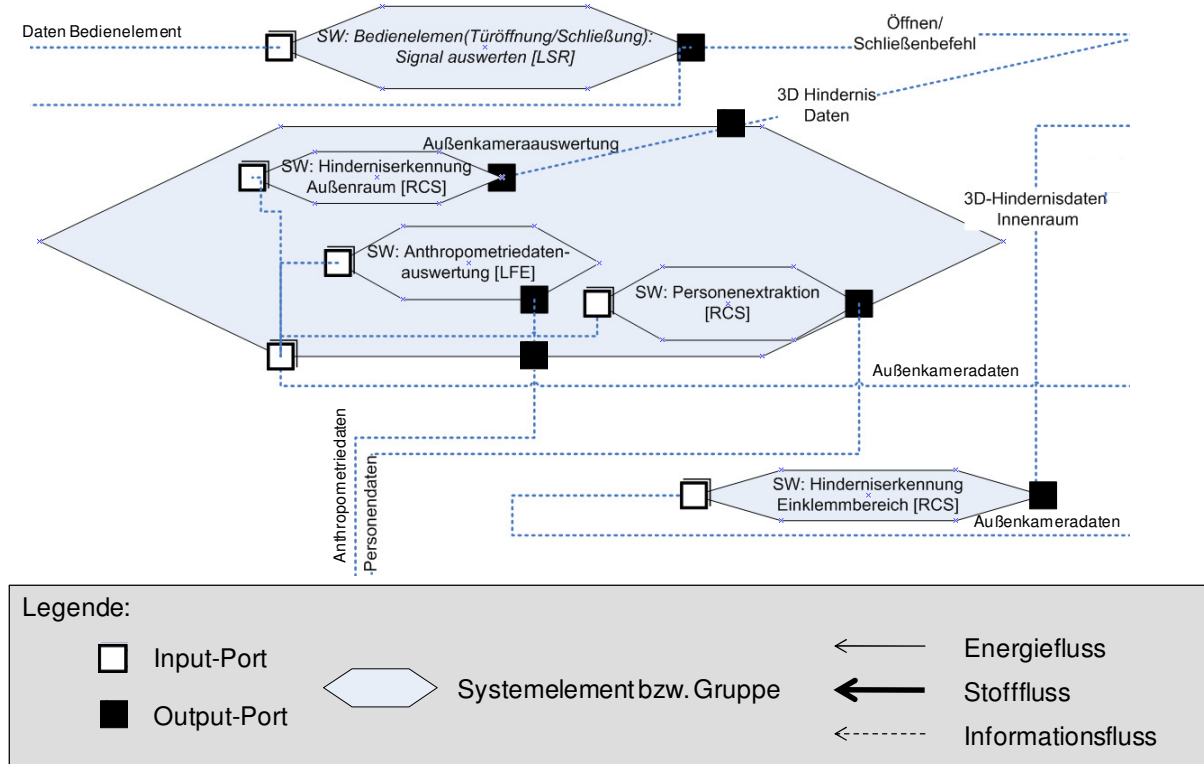


Abbildung 7-6: Ausschnitt der Wirkstruktur (Modellierungstechnik nach GEHRKE [2005])

Im betreuten Projekt wurde zunächst ein Vorschlag für eine Wirkstruktur des betrachteten Systems erarbeitet. Dieser Vorschlag wurde anschließend im interdisziplinären Team vorgestellt und dort iterativ verbessert. Hierdurch konnte das interdisziplinäre Systemverständnis weiter gefördert werden. Neben der in den vorhergegangenen Kapiteln dargestellten Anwendung klassischer Systemmodellierungsmethoden wurden im Rahmen der

Arbeit erweiterte methodische Ansätze zur integrativen Modellierung mechatronischer Abhängigkeiten erarbeitet. Integrativ bedeutet im Kontext der vorliegenden Arbeit die kombinierte Abbildung von Funktionen und Systemelementen. Im Anhang finden sich die durch Kombination von Funktionsmodellen, Wirkstrukturen und Message-Sequence-Diagrammen entstandene Modellierungsmethoden. Diese können als erweiterte Techniken im Analyse und Systemabbildungsprozess Anwendung finden (siehe 12.1).

Das folgende Kapitel beschreibt, wie die bis zu diesem Punkt methodisch erarbeiteten Abhängigkeitsinformationen des mechatronischen Systems vereinheitlicht werden können, um diese anschließend übergreifend visualisieren zu können.

7.6 Vereinheitlichung der erarbeiteten Abhängigkeitsinformationen

Um auf Basis der einzelnen Modelle, die in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden, eine domänen- und disziplinübergreifende Visualisierung der Abhängigkeiten (siehe Kapitel 8) zu ermöglichen, wird eine vereinheitlichende Methode benötigt. Die in Kapitel 3.2.4 vorgestellte MDM-Methodik nach MAURER [2007] bietet hierfür passend die Möglichkeit sowohl Vernetzungen verschiedenster Betrachtungsbereiche zwischen einander als auch Relationen innerhalb der einzelnen Betrachtungsbereiche abzubilden. Darüber hinaus können durch Kombination der Relationen einzelner Teilmatrizen logisch Relationen in anderen Teilmatrizen abgeleitet werden. Dies ermöglicht wiederum die einfache Ableitung von verschiedenen Vernetzungsaspekten (vgl. Kapitel 7.5). MDMs lassen sich prinzipiell beliebig erweitern und gewährleisten daher die notwendige Offenheit für einen generischen Ansatz.

Da die direkte Aufnahme von Abhängigkeiten in einer Matrix auf Grund des abstrakten Charakters insbesondere bei umfangreichen Datenmengen schnell die Gefahr verfälschter Ergebnisse birgt, ist die geschilderte Erarbeitung der Relationen durch geeignete Modellierungstechniken extrem wichtig. So betonen MAURER sowie BROWNING, dass die Handhabung von Matrizen für Entwickler schnell zu komplex werden kann [MAURER ET AL. 2006], [BROWNING 2001].

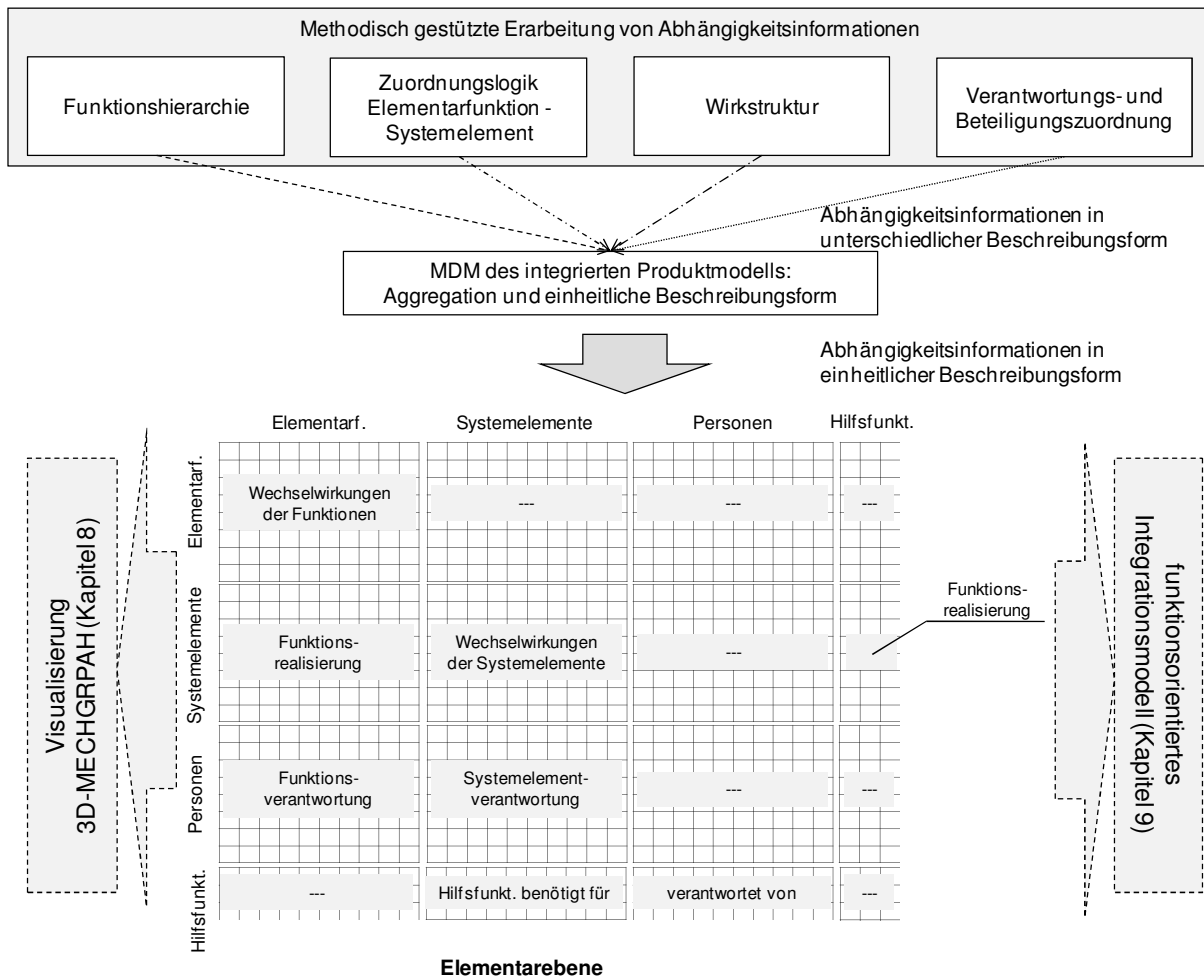


Abbildung 7-7: MDM der Elementarebene des integrierten Produktmodells

Der Aufbau, der aus den einzelnen Teilmodellen abzuleitenden MDM des integrierten Produktmodells, ist in Abbildung 7-7 dargestellt. Zu sehen ist die Elementarebene mit den Betrachtungsdomänen Elementarfunktionen, Systemelemente, Personen und Hilfsfunktionen. Ausgehend von dieser Elementarebene können höhere Abstraktionsebenen wie beispielsweise die Teilfunktionsebene oder Baugruppenebene durch die jeweilige Aggregationslogik der Hierarchie von Funktionsstruktur und Baustruktur abgeleitet werden. Wechselwirkungen und Verantwortlichkeiten werden entsprechend aggregiert.

Die Verantwortlichkeiten (Entwicklungsbeteiligte) können entweder aus den in den Teilmodellen bereits erfolgten Zuordnungen übertragen werden oder notwendigen Falls auch nachträglich aufgenommen werden. Liegen im Unternehmen bereits Verantwortungsdefinitionen für Systemelemente vor, so können die funktionsbezogen Verantwortlichkeiten auf Basis der Funktionsrealisierungsmatrix abgeleitet werden.

Neben den Elementarfunktionen sind zusätzlich die Hilfsfunktionen als eigene Domäne aufgeführt. Aufgenommen wird, für welches Systemelement eine Hilfsfunktion benötigt wird, in welchen Verantwortungsbereich eine Hilfsfunktion fällt und durch welches Systemelement diese realisiert wird. Die entsprechenden Systemelemente werden zusammen mit den Systemelementen zu Realisierung von Elementarfunktionen des betrachteten Systems

aufgelistet, weisen jedoch in den anderen Matrizen keine Relationen auf. Alternativ ist es auch möglich eine weitere separate Domäne zu definieren, um eine klarere Unterscheidung zwischen „Hilfssystemelementen“ und „Kernelementen“ zu erhalten. Im geschilderten Ansatz wird durch die Überprüfung benötigter Hilfsfunktionen aufgezeigt, welche zentralen funktionalen Schnittstellen zu anderen Teilsystemen bestehen und somit dargelegt, welche funktional getriebenen Abstimmungen notwendig sind. Darüber hinaus kann es jedoch aus Eigenschaftssicht weitere wichtige Schnittstellen beziehungsweise Wechselwirkungen zu und mit anderen Teilsystemen geben, die eine Abstimmung mit den entsprechenden Verantwortlichen notwendig machen. Dieser Aspekt wird jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit behandelt. Hierfür sei auf HERFELD [2007], KLEEDÖRFER [1999] und STEINMEIER [1998] verwiesen, die sich hiermit bereits intensiv auseinandergesetzt haben.

Wie in Kapitel 7.1 angesprochen können für den Zusammenbau eines Systems neben den bereits aufgeführten Systemelementen zusätzliche Einzelteile wie Schrauben oder Stecker notwendig sein. Zeigt sich bei der Planung von Integrationsprozessen, dass diese eine bedeutende Rolle spielen oder diese häufig Probleme verursachen, sollten sie ebenfalls als separate Domäne aufgeführt und mit den Systemelementen verknüpft werden.

8 Multidimensionale Abhängigkeitsvisualisierung 3D-MECHGRAPH

In Kapitel 7 wurde aufgezeigt, wie durch den Einsatz von Methoden der Systemmodellierung interdisziplinäre Abhängigkeitsinformationen komplexer mechatronischer Systeme erarbeiten werden können, um das interdisziplinäre Systemverständnis zu verbessern. Betrachtet wurden die Domänen Funktionen, Systemelemente und Personen (Verantwortlichkeiten). Die Vernetzungsinformationen wurden anschließend in Form einer Multidomänenmatrix vereinheitlicht. Da die Darstellung disziplin- und domänenübergreifender Abhängigkeiten eines mechatronischen Systems in Form einer Matrix nur schwer verständlich ist und somit einen intuitiven Zugang zum interdisziplinären Systemverständnis erschwert, wurde ein neuartiger Visualisierungsansatz entwickelt. Zunächst wird in den folgenden Kapiteln auf die Grenzen von stärkebasierten Graphen als eine mögliche Visualisierungsmethode eingegangen. Anschließend werden alternative Ansätze diskutiert. In Kapitel 8.3 wird dann das in dieser Arbeit realisierte Tool (3D-MECHGRAPH) zur integrativen Visualisierung domänenübergreifender Abhängigkeiten mechatronischer Systeme vorgestellt.

8.1 Grenzen stärkebasierter Graphen

Für die einheitliche Aufnahme, der aus den verschiedenen Quellen abgeleiteten Abhängigkeitsinformationen, bietet sich, wie bereits angesprochen, die MDM-Methodik an. Matrizen weisen jedoch erhebliche Schwachstellen in Bezug auf eine nutzer- und interpretationsfreundliche Darstellung auf [MAURER 2008, S.103]. Daher sollte eine bedarfsgerechte Visualisierung der matrixgebundenen Abhängigkeitsinformationen erfolgen. MAURER schlägt für die Visualisierung domäneninterner Abhängigkeiten stärkebasierter Graphen vor (vgl. Kapitel 3.2.5). In stärkebasierten Graphen stoßen sich Elemente, die keine Verknüpfung aufweisen ab. Elemente, die eine Verknüpfung besitzen, ziehen sich hingegen an. Die sich hierdurch ausbildenden Graphen erlauben eine vereinfachte Interpretation von wichtigen strukturellen Besonderheiten. So sind beispielsweise Cluster, Brückenelemente oder Kreisschlüsse leichter zu erkennen, als bei einer gleichmäßigen Verteilung der Elemente (Knoten) ohne Ausrichtungsmechanismus. Jedoch ist die Darstellungsmethode auf die Visualisierung der Abhängigkeiten einer singulären DSM und somit der Abhängigkeiten innerhalb einer einzigen Domäne ausgerichtet. Für die Darstellung von domänenvernetzenden Abhängigkeiten sowie zur integrierten und parallelen Visualisierung mehrerer domäneninterner und domänenübergreifender Abhängigkeiten ist eine Erweiterung erforderlich.

Zur Förderung des interdisziplinären Verständnisses innerhalb der Serienentwicklung mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme sollen in dieser Arbeit die Vernetzungen zwischen und innerhalb der Domänen Funktionen, Systemelemente und Personen (Verantwortlichkeiten) transparent und integrativ dargestellt werden.

Den domänenübergreifenden Vernetzungsaspekt verdeutlicht Abbildung 8-1. Zu sehen sind zwei Ebenen. In der vorderen Ebene findet sich ein stärkebasierter Graph, der die Vernetzung der Elementarfunktionen des neuartigen Einstiegssystems (vgl. Kapitel 7) repräsentiert. Durch die Anwendung eines Farbschemas werden unterschiedliche Disziplinen hervorgehoben. So repräsentieren rote Elemente beispielsweise mechanische Funktionen und gelbe Elemente softwaretechnische Funktionen. Die Vernetzungen innerhalb der Domäne Funktionen wurden mit Hilfe einer DMM aus der Vernetzung der Systemelemente (Wirkstruktur) abgeleitet (vgl. Kapitel 7.5). In dieser DMM ist somit die Projektionsinformation gespeichert, welche Systemelemente welche Funktionen realisieren. Diese domänenübergreifende Vernetzungsinformation kann jedoch bis dato nicht aus den stärkebasierten Graphen herausgelesen werden.

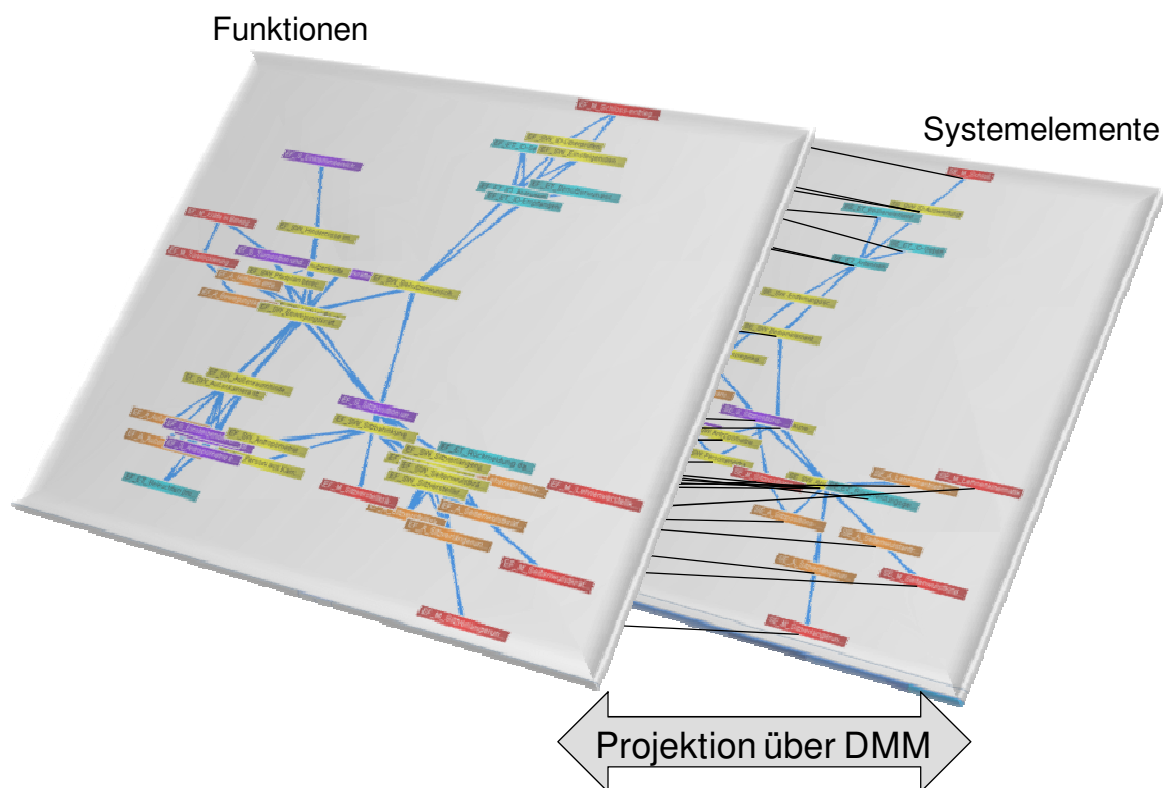


Abbildung 8-1: Verdeutlichung der Vernetzung mehrerer Domänen

In der Literatur finden sich einige Ansätze, die sich mit der Darstellung domänenübergreifender Vernetzungen beschäftigen. Die wichtigsten werden folgend beleuchtet und auf ihre Anwendungspotentiale hin überprüft. Darauf aufbauend wird ein Konzept für eine neuartige Visualisierung domänenübergreifender Abhängigkeiten abgeleitet.

8.2 Alternative Visualisierungsansätze in der Literatur

STEINMEIER entwickelt in seiner Arbeit ein systemtechnisches Produktmodell zur Darstellung der komplexen Abhängigkeiten zwischen Produkteigenschaften und Komponenten. Hierdurch sollen Auswirkungen von Änderungen transparenter werden. Das zugehörige Softwaresystem

AUTOSYS erlaubt die individuelle Modellierung von Teilsystemen und deren farbige Darstellung in Blockdiagrammen. Unterstützte Relationstypen sind Designrelation, Elektrizität, Gestaltrelation, optische Relation, Ortsrelation, thermische Relation, verbindungstechnische Relation. AUTOSYS erlaubt darüber hinaus die Darstellung von direkten oder indirekten Abhängigkeit zwischen Komponenten und Bauteilen in einer sternförmigen Darstellung. Eine integrierte domänenübergreifende Visualisierung der Bereiche Funktionen und Bauteile wird jedoch nicht geboten. [STEINMEIER 1998]

Das Projekt MechaSoft [REINHART ET AL. 2001] beschäftigt sich mit der Zusammenführung der unterschiedlichen Sichten, der an der Entwicklung von mechatronischen Systemen beteiligten Disziplinen (vgl. auch [DOHMEN 2002]). Insbesondere sollen die informationstechnischen Austauschprobleme zwischen den verschiedenen Bereichen durch ein integriertes Datenmodell behoben werden. Die Basis von MechaSoft stellt ein integriertes Produktmodell dar. Zentrales Element zur Generierung des integrierten Produktmodells ist eine hierarchische Funktionsstruktur. Sie ist die sichtenübergreifende Entwicklungs- und Kommunikationsplattform. Zur „...grafischen Repräsentation wesentlicher Bestandteile des betrachteten Gesamtsystems sowie deren Relationen untereinander“ kommen verschiedene Diagrammtypen zum Einsatz [ZÄH 2003] (siehe Abbildung 8-2). Das integrierte Produktmodell wird durch ein PDM-System verwaltet. Dieses stellt den Kern einer integrierten Entwicklungsumgebung dar. Die Darstellung von Komponentensicht und Funktionssicht ist auf optisch getrennte Baumstrukturen beschränkt. Eine Vernetzung von Baustuktur und Funktionsstruktur wird über ein drag and drop Vorgehen realisiert [REINHART ET AL. 2001]. Der Ansatz erlaubt somit eine effektive Aufnahme und Speicherung mechatronischer Vernetzungen. Eine darauf aufsetzende integrierte und domänenübergreifende Visualisierung der Vernetzungen innerhalb und zwischen Funktionen, Systemelementen und Personen, wie sie für diese Arbeit benötigt wird, würde jedoch auch in diesem Fall einen intuitiveren Zugang zu einem interdisziplinären Systemverständnis ermöglichen.

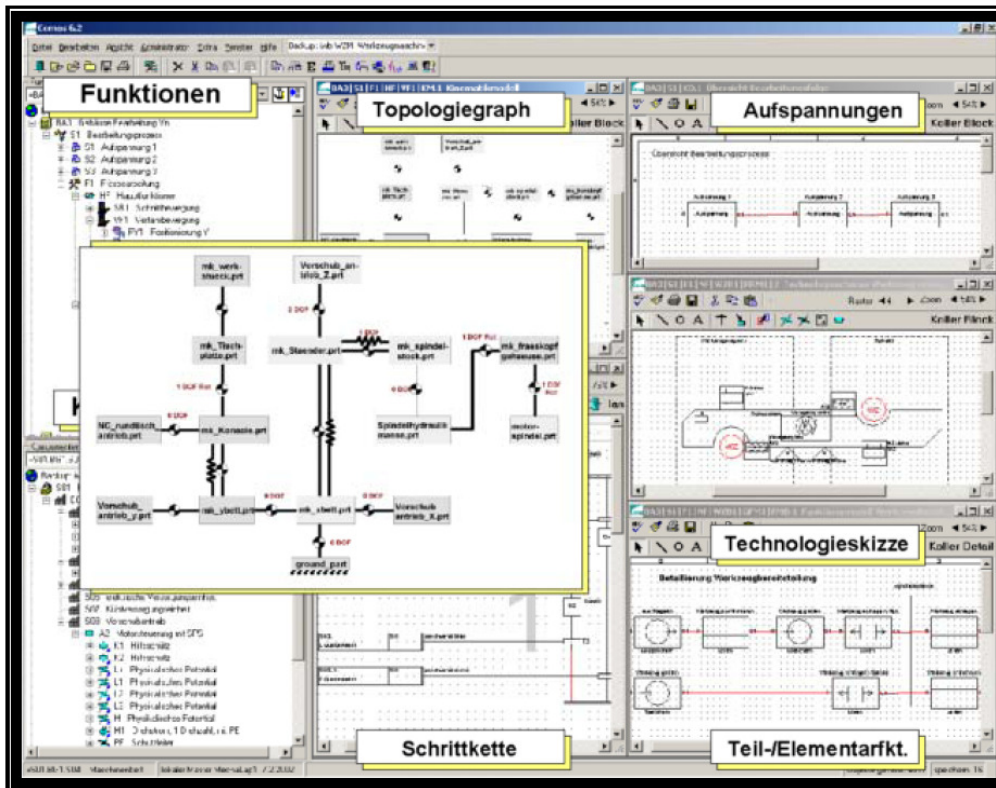


Abbildung 8-2: MechaSoft [ZÄH 2003]

GENDERKA [1994] beschreibt eine objektorientierte Methode zur Entwicklung von Produktmodellen. Die Methode sieht eine dreidimensionale Modellierungssprache zur Erstellung und Visualisierung der Produktmodelle vor. Durch den objektorientierten Charakter der Modellierungsmethode ist ein strenger Formalismus einzuhalten. Zusätzlich ist die vorbereitende Verwendung von klassischen Modellierungstechniken der Produktentwicklung nicht vorgesehen. „Betrachtung und Handhabung erfolgt nur im Modellierungswerkzeug“. Die Modellierungsmethode ist „...so konzipiert, dass auf eine vollständige Dokumentation des Modells verzichtet wird“ [GENDERKA 1994, S. 45]. Wie in den vorherigen Kapiteln aufgezeigt, ist jedoch eine gemeinschaftliche Erarbeitung von verschiedenen Teilmodellen zwingend erforderlich, um ein gemeinsames Systemverständnis zu generieren. Eine sofortige stark formalisierte digitale Modellierung, wie sie durch GENDERKA vorgeschlagen wird, scheint daher wenig praktikabel. Die objektorientierte Beschreibungsmethode bietet zwar Vorteile in Bezug auf die Aufnahme von „beliebigen“ Attributen. Die erstmalige Initiierung eines Produktmodells ist jedoch sehr zeitaufwändig. Dies spiegelt sich in einem Vorgehensmodell mit relativ komplexen Einzelschritten wieder. Das Prinzip der Objektorientierung muss gut durchdrungen sein und erfordert ein erhöhtes Abstraktionsvermögen, um dieses problemlos anwenden zu können. Für Klassen und Objekte schlägt GENDERKA verschiedene Symbole vor, die über Relationen miteinander verbunden werden können. Über 3D-Symbole, die in diesen graphischen 3D-Objekten gekapselt sind,

sollen wiederum Attribute und Funktionen interaktiv aufgerufen werden [GENDERKA 1994, S. 55, 57]. Dies impliziert jedoch eine hohe Bedienungs- und Implementierungskomplexität des Systems. Die für die vorliegende Arbeit benötigte einfache Handhabung domänen- und disziplinübergreifende Visualisierungsfunktionen lassen sich in der Arbeit von GENDERKA nicht in ausreichender Form finden. Trotzdem werden in Bezug auf Interaktivität und Visualisierungstechnik interessante Ansätze beschrieben. Hierzu zählen insbesondere die dreidimensionale Positionierung von Objekten und Relationen sowie die interaktive Verfolgung von Relationen.

Weitere Visualisierungsansätze zur Darstellung komplexer Systeme oder Zusammenhänge findet man auf der Internetseite „Visual Complexity“ [VISUAL COMPLEXITY 2007]. Die Internetseite stellt eine Sammlung verschiedenster Visualisierungsansätze unterschiedlichster Autoren mit unterschiedlichsten Motivationshintergründen dar. Eine Analyse der dort beschriebenen Ansätze konnte jedoch keine für das vorliegende Problem geeignete Visualisierungstechnik identifizieren. Viele der zu findenden Darstellungen scheinen stark durch die Visualisierungstechnik an sich getrieben zu sein und verdeutlichen daher eher die Komplexität, als dass sie zu deren Interpretation beitragen. Neben einer thematischen Klassifizierung der gesammelten Visualisierungsansätze findet sich eine Klassifizierung nach Darstellungstypen. Dies sind: Fluss, Elliptische Implosion, Baum, Bogendiagramme, Radiale Gruppierung, Zentrierte radiale Netzwerke, Globen, Radiale Implosion und Radiale Konvergenz. Folgende Abbildung führt für jede dieser Klassen ein Beispiel auf.

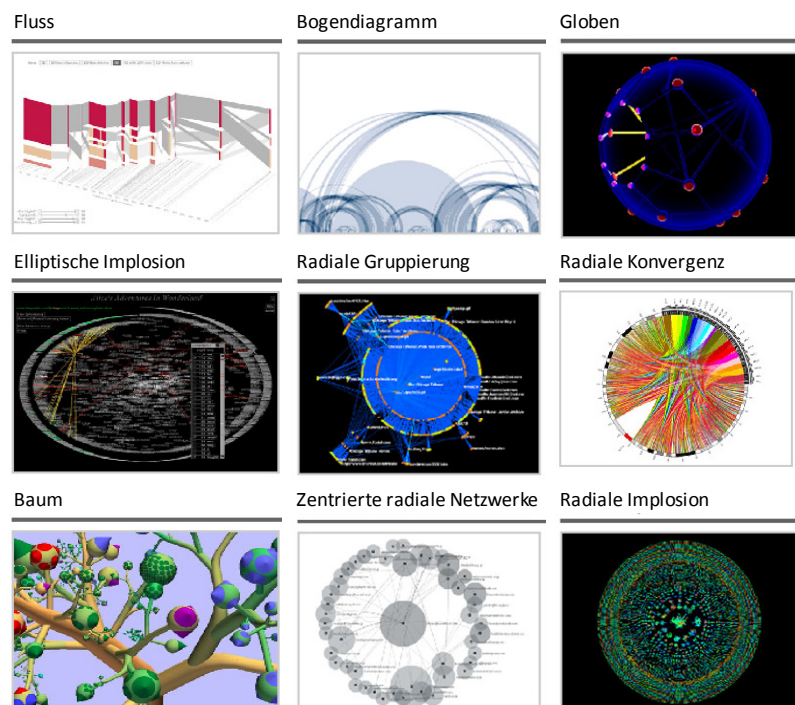


Abbildung 8-3: Visualisierungsmethoden nach Visual Complexity [VISUAL COMPLEXITY 2007]

Einen interessanten Ansatz zur Kombination von Graphen und graphisch repräsentierten Kennzahlen, der sich auch auf Visual Complexity findet, beschreiben BÖRNER ET AL. [2003]. Sie diskutieren in ihrer Veröffentlichung Methoden zur Visualisierung von Wissensdomänen. In diesem Zusammenhang stellen Sie vor, wie mit Hilfe von Zylindern die Zitierhäufigkeit innerhalb eines Autorennetzwerkes verdeutlicht werden kann. Das Autorennetzwerk selbst ist durch einen Graphen repräsentiert. Die beschriebene Visualisierungsmethode ist folgend dargestellt.

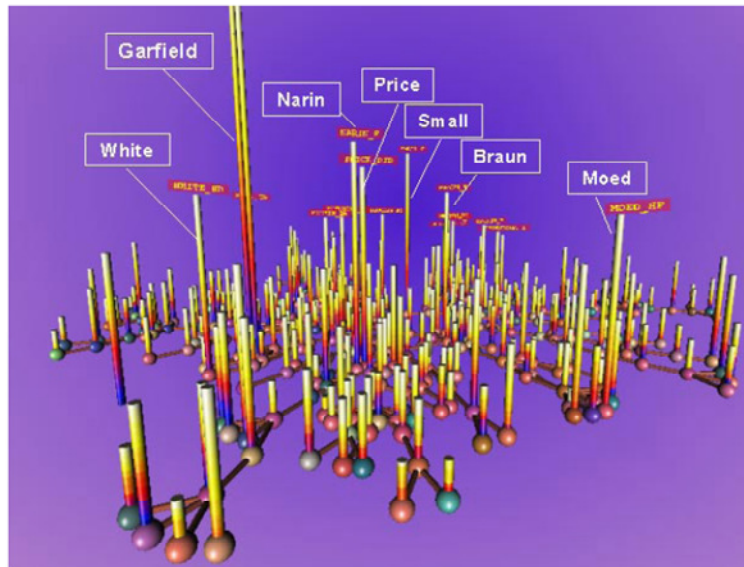


Abbildung 8-4: Visualisierung der Häufigkeit mit der ein Autor zitiert wurde [BÖRNER ET AL. 2003]

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Idee der Visualisierung von Kennzahlen durch Grundgeometrien mit variablen Abmaßen in Kapitel 8.3.1 aufgenommen. Die Visualisierung von Kennzahlen bietet ein erhebliches Potential zur Erleichterung der Interpretation von Strukturen. Im Rahmen des Serienentwicklungsprozesses sind beispielsweise Reifegradkennzahlen von bedeutendem Interesse. Eine leicht interpretierbare Visualisierung der Reife eines Systems und seiner einzelnen Elemente kann die Entscheidungsfindung an zentralen Punkten im Entwicklungsprozess somit erheblich erleichtern.

Weitere hilfreiche Anregungen für die Entwicklung eines geeigneten Visualisierungstools finden sich in diversen Werken zu Systemtechnik. So tauchen in vielen Werken Systemmodelle in Form von Mehrebenenendarstellungen auf (z.B. [GÖPFERT 1998], [DAENZER & HUBER 1999]). Die Ebenen repräsentieren dabei entweder unterschiedliche Aspekte oder verschiedene Abstraktionsgrade eines Systems, seiner Elemente und Relationen (vgl. Kapitel 3.2).

Im Forschungsfeld der Informationsvisualisierung finden sich Ansätze, die ebenfalls auf Mehrebenenendarstellung zurückgreifen, um unterschiedliche Graphen- und Diagrammtypen miteinander zu vernetzen. Das durch COLLINS & CARPANDALE [2007] entwickelte Visualisierungstool VisLink zeigt einen vielversprechenden Ansatz verschiedenste Einzelvisualisierungen miteinander zu vernetzen. Die Unterstützung durch eine geeignete Methodik zur systematischen Erarbeitung der zu visualisierenden Daten fehlt jedoch.

Im folgenden Kapitel wird die Mehrebenentechnik als zentrale Idee zur Repräsentation mehrerer Domänen übernommen (Kapitel 8.3.1). Kombiniert wird dieser Ansatz mit der Darstellungstechnik stärkebasierter Graphen. Kennzahlen werden analog zu BÖHRNER ET AL 2003 durch Volumenprimitive visualisiert.

8.3 Aufbau und Funktionsweise von 3D-MECHGRAPH

Die folgenden Kapitel beschreiben den in dieser Arbeit entstandenen Visualisierungsansatz zur intuitiven Darstellung disziplin- und domänenübergreifender Abhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme. Das entstandene Tool 3D-MECHGRAPH bietet die Möglichkeit methodisch erarbeitete Abhängigkeiten des mechatronischen Systems in integrierter Weise zu visualisieren und interaktiv Abhängigkeiten zwischen Disziplinen und Betrachtungsdomänen (Funktionen, Systemelemente, Personen) nachzuvollziehen. Hierdurch wird ein Ansatz zur Verbesserung des interdisziplinären Systemverständnisses im Rahmen der Entwicklung mechatronischer Automobilsysteme geliefert.

8.3.1 Grundelemente von 3D-MECHGRAPH

Abbildung 8-5 zeigt ein Bildschirmfoto des entstandenen Visualisierungstools 3D-MECHGRAPH. 3D-MECHGRAPH visualisiert Elemente, die unterschiedlichen Domänen zugeordnet wurden, auf unterschiedlichen Ebenen im dreidimensionalen Raum. Die Anzahl der visualisierbaren Domänen ist beliebig. Im Kontext der Arbeit repräsentieren die in Abbildung 8-5 zu sehenden Ebenen Funktionen, Systemelemente und Personen. Mit Hilfe einer transparenten Visualisierung der einzelnen Ebenen ist es möglich, die jeweils dahinter liegenden Objekte zu erkennen. Jede Ebene, die eine Betrachtungsdomäne repräsentiert, kann beliebig viele Elemente enthalten. Die einzelnen Elemente werden wiederum durch Kästchen mit einer definierbaren Farbe und Größe repräsentiert. Im dargestellten Bild sind die Elemente in Form grauer Kästchen zu erkennen.

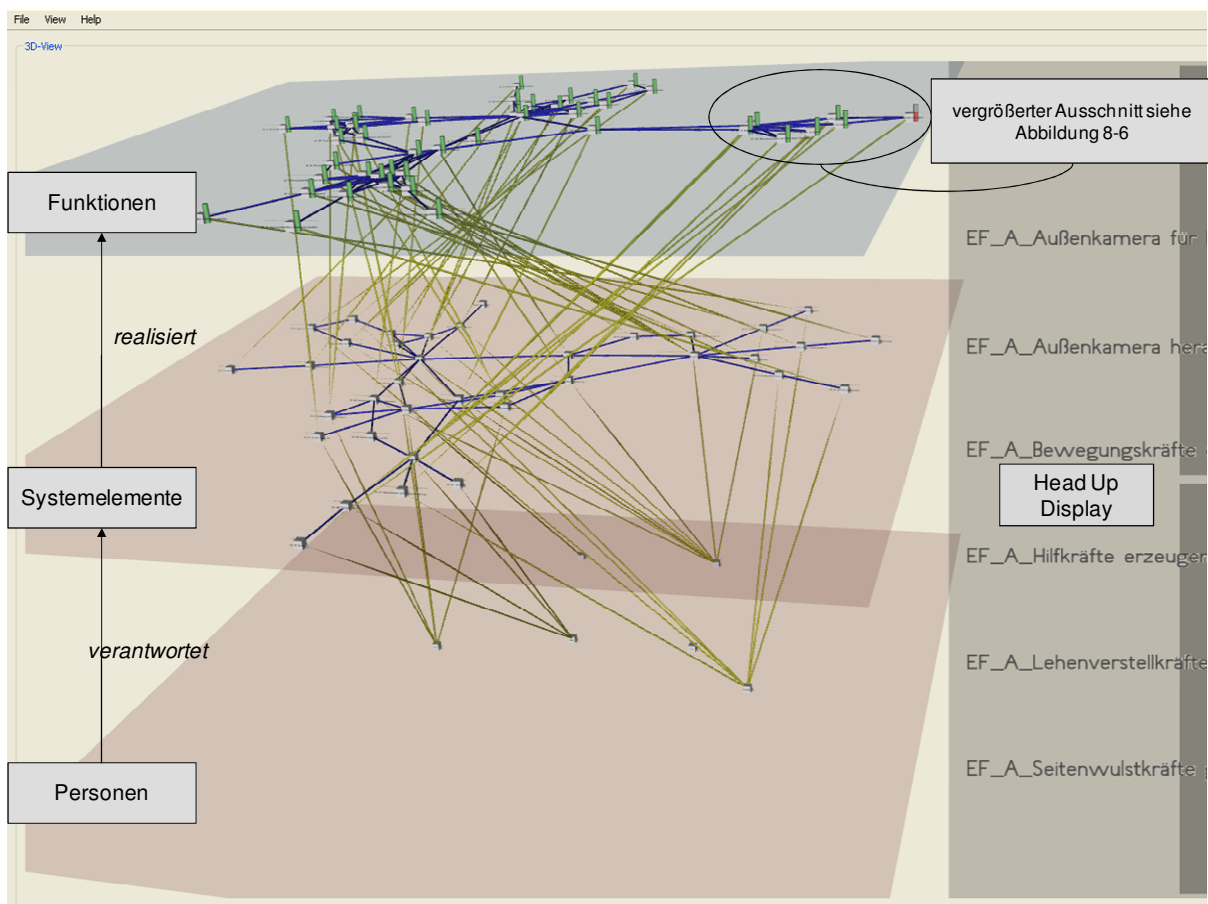


Abbildung 8-5: Grundelemente von 3D-MECHGRAPH

Zwischen den grauen Kästchen verlaufen blaue und gelbe Verbindungslinien. Die blauen Verbindungslinien liegen innerhalb einer Domäne und stellen Abhängigkeiten zwischen Elementen der gleichen Domäne dar. Entsprechend repräsentieren die gelben Vektoren domänenübergreifende Relationen. Die unterste Ebene weist im gezeigten Beispiel keine domäneninternen Verknüpfungen auf, da die gegenseitigen Personenabhängigkeiten nicht betrachtet wurden. Auf der mittleren Ebene entsprechen die Verbindungsvektoren Schnittstellen zwischen Systemelementen auf Basis einer Wirkstruktur. Vektoren innerhalb der obersten Ebene stellen im gezeigten Fall Abhängigkeiten zwischen Funktionen dar. Diese wurden durch eine Matrizenkombination aus der Vernetzung der Systemelemente abgeleitet (siehe Kapitel 7.5, 7.6).

Die Position der einzelnen Elemente innerhalb einer Domäne basiert auf einem Algorithmus zur Berechnung von stärkebasierten Graphen. In stärkebasierten Graphen stoßen sich Elemente, die nicht miteinander verbunden sind ab. Elemente die miteinander verbunden sind, ziehen sich an. Die entstehenden Strukturen erlauben eine intuitivere Analyse. Beispielsweise sind Cluster durch gehäufte Elementgruppen oder Kreisschlüsse durch ringförmige Strukturen visuell erkennbar [MAURER 2007, S.199 FF]. Die Berechnung der Ausrichtung der einzelnen

Elemente erfolgt in einem separaten Programm und wird über eine Schnittstelle importiert. Auf den Datenaustausch der beiden Programme wird detaillierter in Kapitel 8.3.5 eingegangen.

Relationen zwischen Elementen unterschiedlicher Domänenzugehörigkeit sind als „kraftlose“ gelbe Linien zwischen den Ebenen dargestellt. Kraftlos bedeutet, dass diese keine Auswirkung auf die Ausrichtung der stärkebasierte Graphen der einzelnen Domänen haben. In Kapitel 8.4.3 werden diesbezüglich Konzepte diskutiert, wie eine Ausrichtungslogik über Domänenebenen hinweg umgesetzt werden könnte.

In Abbildung 8-5 repräsentieren die gelben Verbindungslinien somit DMM-basierte Abhängigkeiten. Ein Verbindungsvektor zwischen einem Element der Ebene Funktion und einem Element der Ebene Systemelement bringt in Bezug auf die vorliegende Arbeit beispielsweise den Sachverhalt: „Funktion X wird realisiert durch Systemelement Y“ graphisch zum Ausdruck. Die direkten Relationen zwischen Personen und Funktionen sind im gezeigten Fall aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgeblendet, könnten jedoch prinzipiell ohne weiteres dargestellt werden (siehe Kapitel 8.3.2).

Im rechten Teil des Fensters ist ein halbdurchsichtiges Feld mit einer Namensliste zu erkennen. Dieses seitliche Feld wird folgend Head-Up-Display genannt. Dieses Head-Up-Display kann zur Anzeige von Objektdaten sowie zur gezielten Selektion von Objekten genutzt werden. Hierauf wird genauer in Kapitel 8.3.2 eingegangen.

Abbildung 8-6 zeigt einen Detailausschnitt der in Abbildung 8-5 bereits abgebildeten Struktur⁴. Zu erkennen sind an die Elemente angelagerte Tonnen mit verschiedenen Füllständen und unterschiedlichen Farben. Mit Hilfe dieser Zylinder können zusätzliche Kennzahlen visualisiert werden. Im dargestellten Fall repräsentieren die Tonnen in Verbindung mit einem Ampelsystem den durch eine Absicherungsaktivität ermittelten Reifegrad der einzelnen Funktionen. Zu sehen ist, dass sechs Elementarfunktionen des Teilsystems Comfort Access keine Probleme bereiten, jedoch die mechanische Funktion Schloss entriegeln auf Grund einer Fehlkonstruktion mit negativem Status abgeprüft wurde.

⁴ Cluster in der obersten Ebene auf der rechten Seite

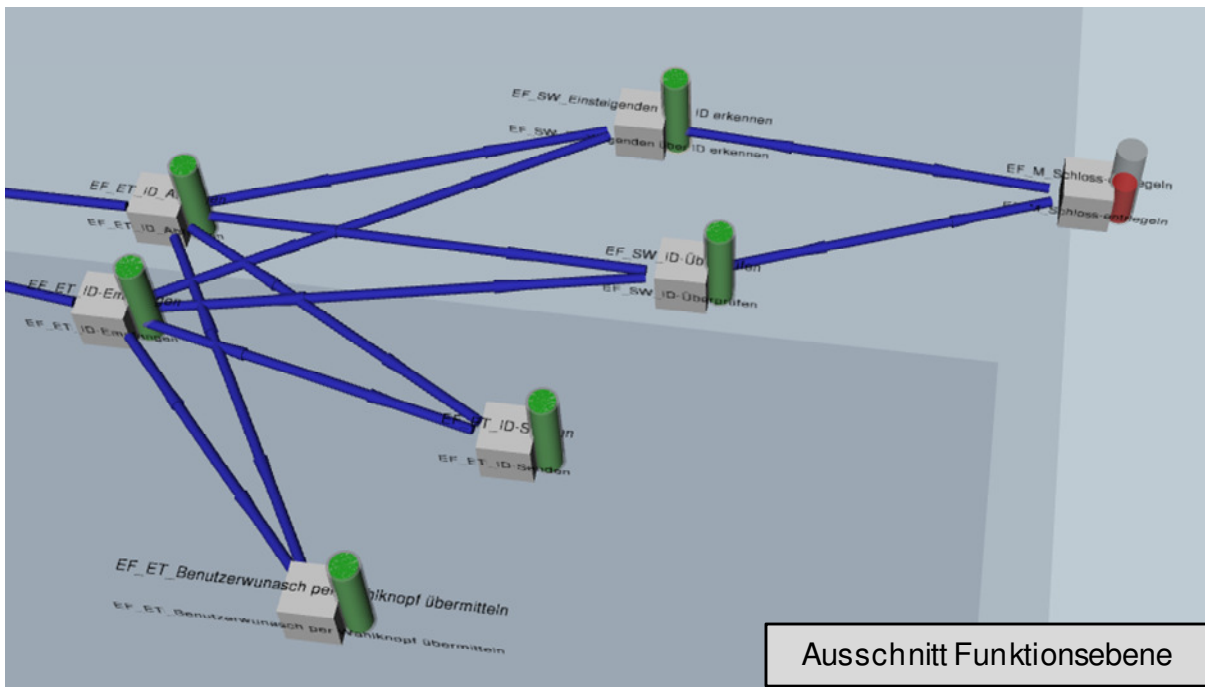


Abbildung 8-6: Tonnen mit variabler Füllhöhe und Farbcodierung zur Visualisierung von Kennzahlen

Weitere Kennzahlen, die mit Hilfe der Tonnen visualisiert werden können, sind:

- Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Bauteil, Funktions-, Absicherungskosten, Variantenanzahl über Produktlinien und Derivate hinweg,
- Qualitätskennzahlen: Anzahl der durch das Element verursachten Gewährleistungsfälle, Risikoprioritätszahl aus FMEA
- Eigenschaftsbezogene Attribute: Gewicht, Volumen, durchschnittliche Leistungsaufnahme, Wirkungsgrad
- Strukturbezogene Kennzahlen: Anzahl der Kreisschlüsse in die ein Element involviert ist, Aktivsumme, Passivsumme, Aktivität, Kritikalität [MAURER 2007, S. 199 ff]

Diese knappe Auflistung möglicher Kennzahlen, deren Visualisierung bei einer Analyse von Systemen und deren Strukturen unterstützt, deutet bereits ein weites Feld von potentiellen Anwendungsbereichen für 3D-MECHGRAPH an. Erweiterte Szenarien der Nutzung von 3D-MECHGRAPH finden sich daher in Kapitel 8.3.7 und im Anhang 12.2. Neben den Tonnen können zusätzlich die einzelnen Elementkästchen in ihrer Höhe und Größe variiert werden, um notwendigen Falls zwei unterschiedliche Kennzahlen simultan zu visualisieren.

8.3.2 Interaktionstechniken

Da die in 3D-MECHGRAPH repräsentierten Strukturen schnell sehr umfangreich und damit unüberschaubar werden können, wurden verschiedene Interaktionstechniken integriert. Als Grundfunktionalität dient die interaktive Navigation im 3D-Raum mit Hilfe einer Dreitastenmaus. Über die Maus können Zoomen, Translation und Rotation gesteuert werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit in Teilbereiche der Struktur „hineinzufiegen“ und Teilumfänge in vergrößerter Ansicht zu betrachten. Ebenfalls ist es möglich die Ebenen mit Hilfe der 3D-Navigation aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten. So ist es möglich lotrecht auf die oberste Ebene zu blicken um den Deckungsgrad der einzelnen Domänenstrukturen zu überprüfen oder gezielt die Struktur einer einzelnen Domäne zu analysieren.

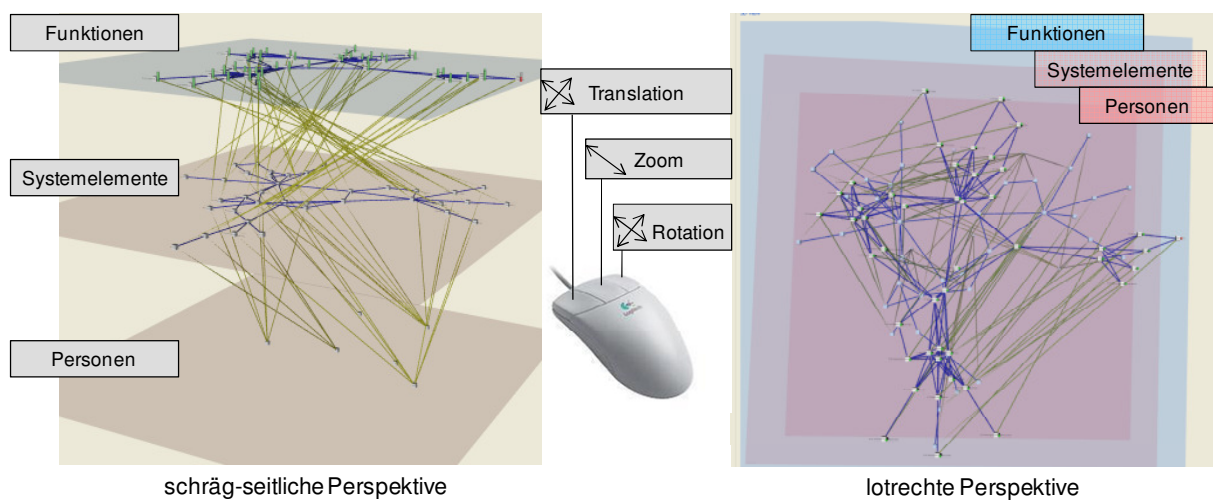


Abbildung 8-7: Interaktive 3D-Navigation per Maus

Neben der dreidimensionalen Navigation wurden Funktionen zur Kollisionserkennung implementiert. Diese erlauben das interaktive Selektieren der graphischen Objekte: Ebenen, Kästchen oder Text im Head-Up-Display. Wird eine Ebene durch ein Klicken mit der Maus selektiert, so werden alle Elemente dieser Ebene und die mit den Elementen verbundenen Relationen (domänenintern und domänenübergreifend) ein- beziehungsweise ausgeblendet. Hierdurch kann der Fokus gezielt auf die Relationen der relevanten Betrachtungsdomänen gelegt werden.

Um sich darüber hinaus selektiv strukturelle Zusammenhänge anzeigen zu lassen, können einzelne Elemente entweder über einen Klick auf die im Head-Up-Display aufgeführte Bezeichnung oder durch einen Klick auf das zugehörige Kästchen in der 3D-Welt ausgewählt werden. Die Aktionen bewirken, dass jeweils nur die direkte Nachbarschaft des selektierten Elementes angezeigt wird. Das bedeutet, dass alle mit dem selektierten Element über eine direkte Relation verbundenen Elemente und die zugehörigen Relationsvektoren angezeigt werden. Die anzuzeigende Nachbarschaftstiefe kann zuvor im Quelltext definiert werden, so

dass nicht nur direkte sondern auch indirekte Abhängigkeiten bis zur eingestellten Tiefe dargestellt werden [vgl. TESEON 2008]. Im Head-Up-Display wird das jeweils selektierte Objekt farbig hervorgehoben.

Durch die Selektionsfunktion wird die Basis für eine interaktive Erfassung der interdisziplinären Abhängigkeiten des mechatronischen Systems geliefert. Der jeweilige Nutzer kann das ihn betreffende Element auswählen und Schritt für Schritt erfahren, welche Elemente mit diesem verknüpft sind. In Abbildung 8-8 ist aus der in Abbildung 8-5 dargestellten Gesamtstruktur das Systemelement Außenspiegelkamera (blau hervorgehoben) selektiert. Es werden die Verbindungen innerhalb der Systemelementebene sowie die zu den Ebenen Funktion und Person angezeigt. Der Nutzer kann nun in die Szenerie hineinzoomen, um die Abhängigkeiten genauer zu analysieren oder durch Klicken auf die dargestellten Elemente weiter in der Struktur navigieren.

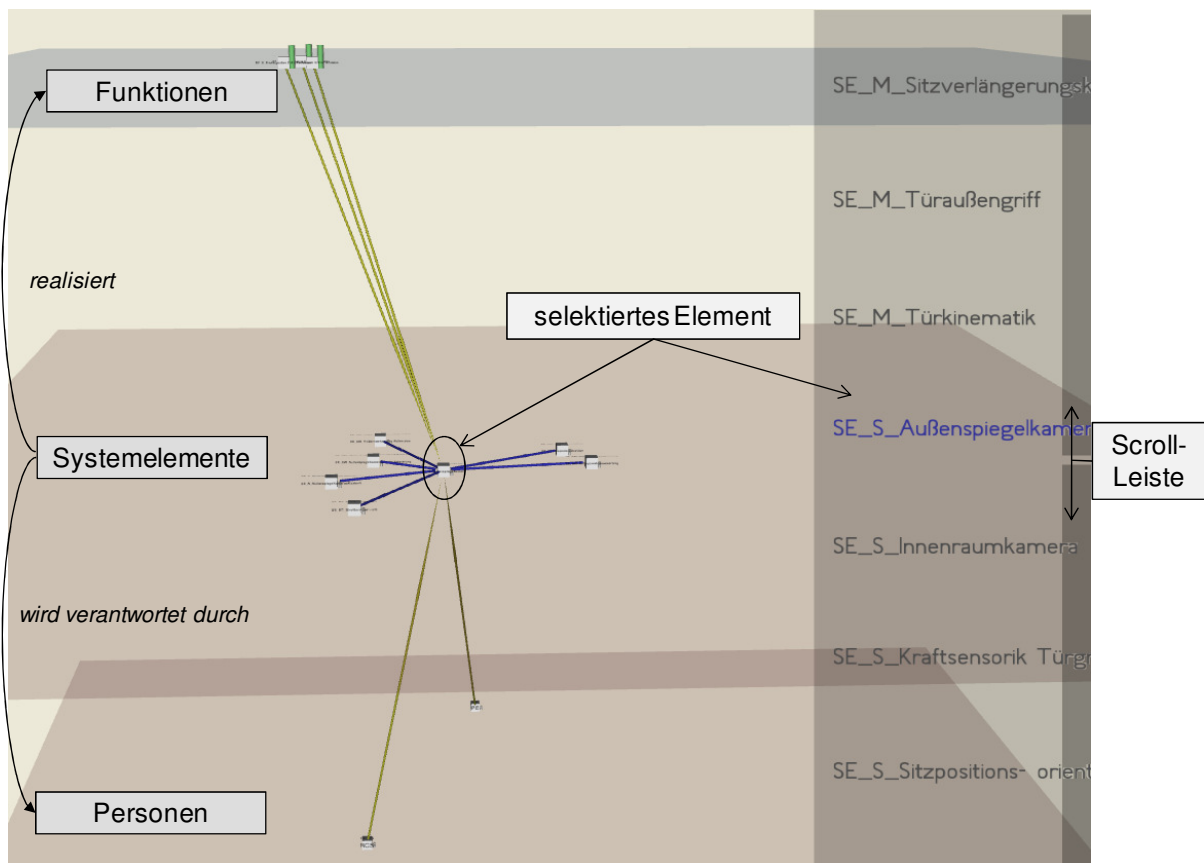


Abbildung 8-8: Verdeutlichung der Selektionsfunktion

8.3.3 Grundlogik der Strukturdefinition

Das vorgestellte Visualisierungstool 3D-MECHGRAPH wurde so programmiert, dass eine leichte Anpassung der darzustellenden Struktur möglich ist. Über eine separate

Konfigurationsdatei im Format der **EX**tensible **MA**rku**P** **L**anguage (kurz XML) können die wichtigsten Parameter verändert und die Struktur mit ihren Ebenen, Elementen und Relationen definiert werden. Das XML Format erlaubt die „Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien“ [WIKIPEDIA 2008]. Die XML-Sprache bietet eine hohe Flexibilität in Bezug auf unterschiedlichste Anwendungsgebiete. Darüber hinaus ist durch eine klare optische Strukturierung mit Hilfe von Tags (Auszeichner, Markierer) und Tabulatoren eine gute Lesbarkeit gewährleistet. So können durch kombinierte Verwendung von Start und Endtags logische Bereiche (Knoten) der hierarchischen Struktur definiert und gekapselt werden. Die für 3D-MECHGRAPH verwendete Konfigurationsdatei im XML-Format nutzt als wichtigste Strukturtags Ebenen, Elemente und Relationen. Der strukturelle Aufbau der Datei ergibt sich wie folgt:

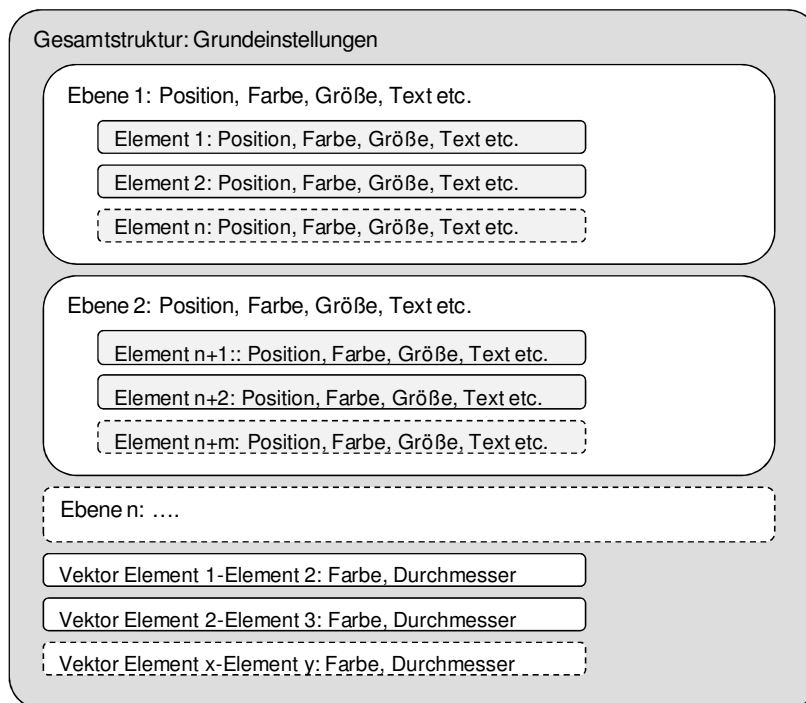


Abbildung 8-9: Hierarchische Grundstruktur der Konfigurationsdatei

Wie zu sehen, enthält die Gesamtstruktur Ebenen, die wiederum Elemente enthalten. Zusätzlich tauchen auf gleicher Hierarchiestufe der Ebenen Vektoren auf. Die Vektoren verbinden Elemente gleicher und verschiedener Ebenen. Daher sind sie nicht in den Ebenentags gekapselt. Für alle in 3D-MECHGRAPH visualisierten Objekte können Einstellungen über Attribute definiert werden. Abmessungsparameter, Farbe, Beschriftung und Position stellen die wichtigsten Einstellmöglichkeiten dar. Die zweidimensionalen Koordinaten der einzelnen Elemente auf den jeweiligen Ebenen wurden im Rahmen dieser Arbeit aus einem zweiten Tool abgeleitet. Dieses Tool stellt DSM-Vernetzungen in Form von stärkebasierten Graphen dar. Auf den Datenaustausch zwischen diesen beiden Programmen

geht Kapitel 8.3.5 näher ein. Betont sei jedoch an dieser Stelle, dass die Positionsdaten prinzipiell auch aus anderen Quellen abgeleitet oder „frei“ bestimmt werden können.

8.3.4 Erweiterte Möglichkeiten der Strukturdefinition

Da durch die Struktur der Konfigurationsdatei eine große Flexibilität ermöglicht wird, muss zuerst klar gestellt werden, welchem Zweck die Repräsentation dienen soll. Das heißt, es muss im ersten Schritt definiert werden, welche Systemaspekte die Ebenen repräsentieren sollen. Bezugnehmend auf Kapitel 7, in dem das integrierte Produktmodell aufgebaut wird, existieren im Rahmen dieser Arbeit drei Hauptbetrachtungsbereiche: Funktionen, Systemelemente, Personen. Die entsprechende Aufgliederung wurde bereits in Abbildung 8-5 dargestellt. Jeder Hauptbetrachtungsbereich wurde durch eine Ebene repräsentiert. Darüber hinaus können jedoch weitere Betrachtungsaspekte eine detaillierte Aufgliederung auf zusätzliche Ebenen erfordern. So können beispielsweise folgende Aspekte die Aufgliederung bestimmen:

- Abstraktionsgrade und Hierarchieebenen:
 - Hierarchieebenen der Funktionshierarchie
 - Hierarchieebenen der Baustruktur
- Charakterisierung der Elemente:
 - Disziplinzugehörigkeit: Elektrisch – Mechanisch – Software
 - Übernahmeteil aus Vorgängerprojekt – Neuteil
 - Zukaufteil – Interne Entwicklung und Fertigung

Geprägt ist die zu erzeugende Struktur somit vom Interpretationsziel. Wird für jede Disziplin eine eigene Ebene definiert, so werden die interdisziplinären Wechselwirkungen stärker hervorgehoben. Alternativ könnten die einzelnen Elemente in Abhängigkeit ihrer Disziplinzugehörigkeit unterschiedlich eingefärbt werden. Die Aussageprägnanz ist jedoch deutlich geringer. Eine Unterscheidung nach Übernahmeteilen und Neuteilen kann wiederum helfen Entwicklungsschwerpunkte richtig zu setzen. In ähnlicher Weise kann die Aufgliederung nach Zukaufteilen und in Eigenleistung hergestellten Teilen die Planung von Integrations- und Absicherungsprozessen unterstützen.

Durch die Repräsentation einzelner Hierarchieebenen einer Funktions- oder Baustruktur durch Ebenen kann zum einen der Gesamtzusammenhang zwischen Gesamtziel und den einzelnen Teilzielen nachvollzogen werden, zum anderen ist es jedoch auch möglich durch die einzelnen Ebenen Detaillierungsgrade oder zu neudeutsch ausgedrückt „*Levels of Detail*“ zu realisieren. Die Vektoren zwischen den Ebenen repräsentieren in diesem Fall die Beziehung „*ist Teil von*“ oder „*besteht aus*“.

Eine weitere Aufgliederungsmöglichkeit betrifft die Abhängigkeiten innerhalb der Domäne Systemelemente. In Bezug auf die in Kapitel 7.5 diskutierten verschiedenen Wechselwirkungsaspekte zwischen Systemelementen können diese getrennt auf verschiedenen Ebenen visualisiert werden.

Erweiterte Anwendungspotentiale und die damit verbundenen Ebenendefinitionen werden in Kapitel 12.2 dargestellt. Zunächst wird jedoch auf den Import der für die Darstellung benötigten Strukturdaten eingegangen. (Siehe auch Anhang 12.2).

8.3.5 Import von domäneninternen und domänenübergreifenden Strukturdaten

In Kapitel 7 wurde beschrieben, wie durch ein methodisch gestütztes Vorgehen Abhängigkeitsinformationen zwischen den Bereichen Funktionen, Systemelemente und Personen erarbeitet werden können. Für die Vereinheitlichung der Abhängigkeitsinformationen wurde auf Grund der hohen Strukturiertheit eine Multidomainmatrix propagiert. Hierfür bietet das Programm LOOME0 der Firma Teseon GmbH [TESEON 2008] bereits eine sehr gute Unterstützung. Das Programm ermöglicht die Analyse von komplexen Strukturen auf Basis von Matrizen unter Verwendung verschiedenster Algorithmen. Zentrale Beispiele der Analysefunktionen sind die Berechnung von Clustern oder Kreisschlüssen. Desweiteren wird die MDM-Methodik unterstützt, so dass nach den in Kapitel 3.2.4 vorgestellten Ableitungsregeln einzelne Matrizen durch die Kombination mehrerer Teilmatrizen berechnet werden können. Zusätzlich besitzt LOOME0 ein ausgefeiltes Visualisierungsmodul. Dieses erlaubt die Darstellung von DSM-Strukturen in Form von stärkebasierten Graphen (siehe Abbildung 8-10 rechts).

Um diese Interpretationsvorteile in der domänenübergreifenden Darstellung des 3D-MECHGRAPH nutzen zu können und um eine aufwändige Neuprogrammierung der Ausrichtungsalgorithmen zu vermeiden, wurde eine Schnittstelle zum Datenaustausch zwischen LOOME0 und 3D-MECHGRAPH implementiert (siehe Abbildung 8-10). Daten die hierüber ausgetauscht werden, sind zum einen die in den Matrizen enthaltenen Informationen über die Verknüpfung der Elemente. Hierüber können später die notwendigen Verbindungvektoren in 3D-MECHGRAPH bestimmt werden. Zum anderen werden aus dem Visualisierungsmodul von LOOME0 die 2D-Koordinaten der einzelnen Elemente der domänenspezifischen Graphen ausgegeben. Mit Hilfe dieser Koordinateninformationen werden die einzelnen Elemente in 3D-MECHGRAPH auf den zugehörigen Ebenen positioniert (lokales Koordinatensystem der Ebene). Optional können in LOOME0 berechnete strukturbezogene Kennzahlen in 3D-MECHGRAPH durch die Tonnen oder die Größe der einzelnen Elementblöcke visualisiert werden. Bereits angesprochen wurde, dass je nach Analyseschwerpunkt zusätzliche oder andere Kennzahlen von Interesse sein können. Diese müssen manuell in die Konfigurationsdatei eingepflegt oder durch Kopplung von 3D-MECHGRAPH mit einem weiteren Programm automatisiert abgeleitet werden.

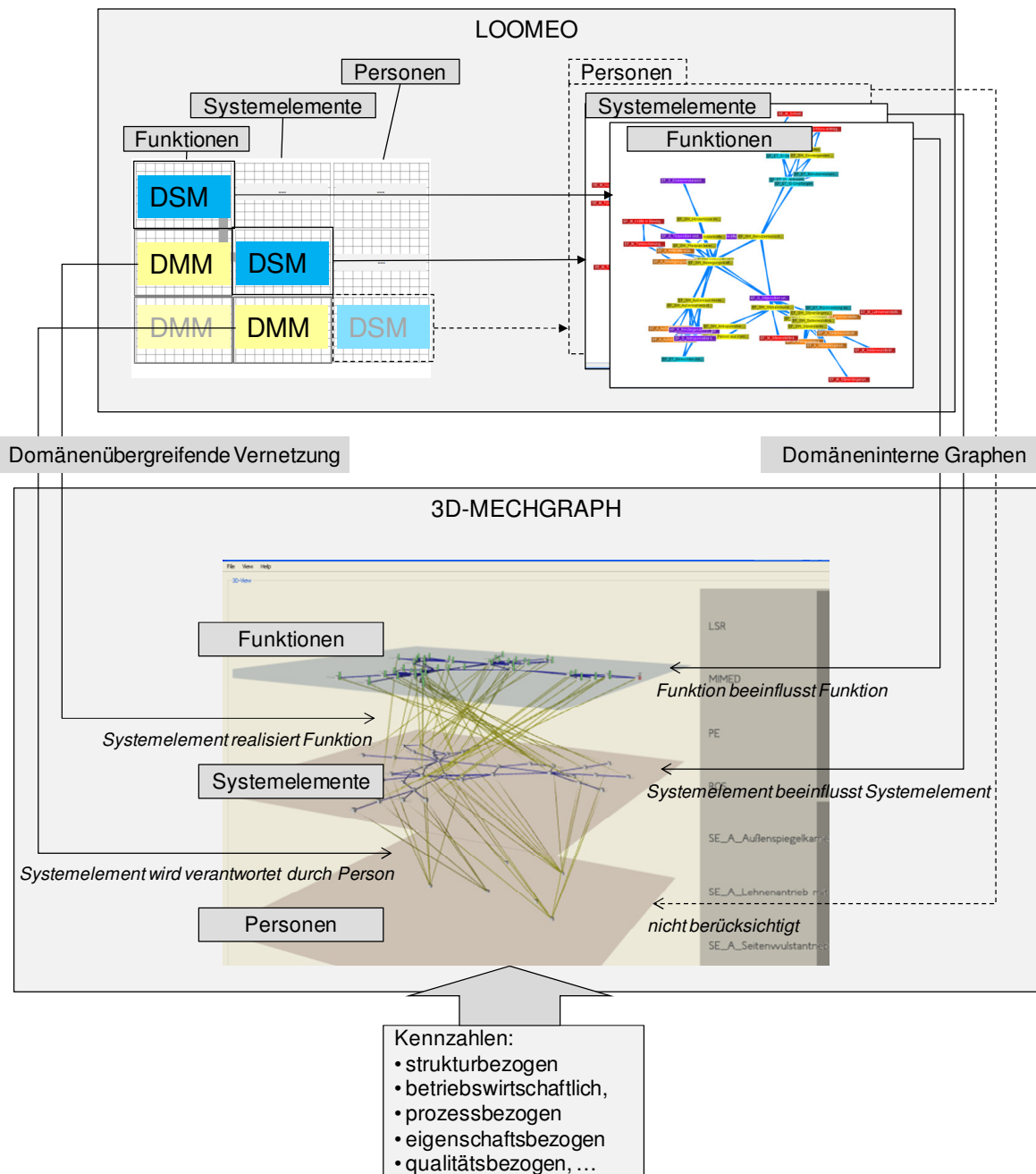


Abbildung 8-10: Import von domäneninternen Graphen, domänenübergreifenden Vernetzungen und Kennzahlen

Zu betonen ist an dieser Stelle, dass der Idealzustand eine direkte Integration von 3D-MECHGRAPH in das Tool LOOME0 darstellt. Dies sollte bei ausreichender Erfahrung mit den in Kapitel 8.4 diskutierten Erweiterungen angestrebt werden. An Mächtigkeit würde 3D-MECHGRAPH auch durch die Programmierung von direkten Schnittstellen für die wichtigsten Datenquellen wie CAD oder PDM-Systeme gewinnen. Ausgetauscht werden müssten primär Elementbezeichnungen und die Relationsinformationen zwischen diesen

Elementen. Einen vielversprechenden Ansatz zur integrierten Verwaltung mechatronischer Daten beschreibt DETTMERING [2007]. Verschiedene Domänenspezifische PDM-Systeme werden über ein Backbone-PDM miteinander gekoppelt. Dabei können sowohl hierarchische Verknüpfungen als auch Verknüpfungen zwischen Elementen einer Ebene verwaltet werden. Die in der durch DETTMERING geforderten PDM-Bebauung verwalteten Relationsdaten könnten durch die Schaffung einer Schnittstelle zu 3D-MECHGRAPH visualisiert und analysiert werden.

8.3.6 Softwaretechnische Grundlagen

Programmiert wurde 3D-MECHGRAPH in C++ unter Verwendung der opensource Bibliothek OpenSceneGraph [OPENSCENEGAPH 2008]. OpenSceneGraph ist eine Entwicklungsbibliothek für die Erstellung von hochperformanten 3D-Graphikanwendungen. Eingesetzt wird OpenSceneGraph insbesondere für die Programmierung von visuellen Simulationen, Spielen, Virtual Reality Anwendungen sowie zur Visualisierung und Modellierung in verschiedenen Gebieten der Wissenschaft. OpenSceneGraph nutzt die Technik der Szenengraphen. Durch eine hierarchische Baumstruktur mit Knoten und Relationen zwischen den einzelnen Hierarchieebenen wird in einem Szenengraphen ein sogenanntes „Universum“ abgebildet. Der Ursprungsknoten an dem alle anderen Knoten hängen, wird Wurzelknoten (rootnode) genannt. Die Kinderknoten, die an diesem Wurzelknoten hängen, können in Abhängigkeit des jeweiligen Knotentyps wiederum Kinderknoten besitzen. So existieren Gruppenknoten an die weitere Kinder angehängt werden und Knotentypen, die dies nicht vorsehen. Beispielsweise sind Geometrieknoten Blattknoten und können entsprechend keine Kinder aufweisen. Ein Beispiel für eine Gruppe in Bezug auf 3D-MECHGRAPH ist die Domäne. Ein Domänenknoten weist als Kinder Geometrieknoten auf, die die einzelnen Elemente dieser Domäne repräsentieren (z.B. Elementarfunktionen innerhalb der Funktionsebene). Hinzu kommen Geometrieknoten für die Repräsentation der domäneninternen Vektoren und für die Repräsentation der transparenten Domänenebene.

Darüber hinaus existiert eine Menge an weiteren Knotentypen die wesentlich das Verhalten und Erscheinungsbild der Anwendung bestimmen. Da die Beschreibung der Klassen und Funktionen von OpenSceneGraph sowie deren Anwendungsmöglichkeiten eine ganzes Buch füllen, kann an dieser Stelle aus Gründen des Umfangs lediglich auf dieses verwiesen werden [MARTZ 2007; KUEHNE & MARTZ 2007]. Die Nutzung der vorgefertigten Funktionen und Klassen sowie die relativ einfache Lesbarkeit des entstehenden Quelltextes bietet jedoch nach Erfahrung des Autors ein erhebliches Potential 3D-MECHGRAPH deutlich zu erweitern. Dies betrifft insbesondere Funktionen für die Interaktion und Visualisierung. So kann 3D-MECHGRAPH ohne Aufwand auf einem Virtual Reality Ausgabegerät wie beispielsweise einer Powerwall ausgegeben werden. Hierfür muss lediglich in einer Programmzeile der Ausgabemodus von Mono auf Stereo umgestellt werden. Auch die Nutzung von 3D-Eingabegeräten ist durch OpenSceneGraph bereits unterstützt. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um die räumliche Navigation durch Nutzung einer Space Mouse zu beschleunigen.

8.3.7 Erweiterungskonzept zur Visualisierung zeitlich variabler Strukturen

Die verschiedenen potentiellen Anwendungsbereiche von 3D-MECHGRAPH lassen sich gut an Hand des in Tabelle 8-1 dargestellten Ordnungsschemas einsortieren und diskutieren.

Tabelle 8-1:

	Konstant	Variabel
Verknüpfungsschema		
Verknüpfungsstärke		
Zusammensetzung		

In einer singulären Matrix (DSM, DMM oder MDM) kann lediglich eine Abbildung eines konstanten Verknüpfungsschemas der einzelnen Elemente eines Systems mit zugehöriger konstanter Verknüpfungsstärke und konstanter Zusammensetzung der Elemente abgebildet werden. DANILOVIC & SANKULL betonen in diesem Zusammenhang das Design Structure Matrizen statische Abbildungen sind und aus diesem Grunde Analysen mit Hilfe der Strukturmatrizen kontinuierlich wiederholt werden müssen [DANILOVIC & SANKULL 2005]. In den vorherigen Kapiteln wurden Strukturen abgebildet und diskutiert, die diese zeitliche Konstanz in allen Bereichen aufweisen. In einem solchen Fall repräsentieren die einzelnen Ebenen von 3D-MECHGRAPH entweder unterschiedliche Betrachtungsaspekte auf die Verknüpfungen innerhalb einer Domäne oder unterschiedliche Domänen.

Bei Integration von Zeitvariabilitäten können prinzipiell zwei unterschiedliche Visualisierungskonzepte in Bezug auf 3D-MECHGRAPH angestrebt werden. Im ersten Fall würden die einzelnen Ebenen unterschiedliche Zeitpunkte repräsentieren. Eine Ebene würde somit das zu diesem Zeitpunkt vorliegende Verknüpfungsschema, die vorliegende Verknüpfungsstärke und die vorliegende Systemzusammensetzung darstellen. Ein mögliches Anwendungsbeispiel hierfür bietet der Entwicklungsprozess. Die einzelnen Ebenen von 3D-MECHGRAPH würden in diesem Fall die einzelnen Meilensteine (z.B. Absicherungsaktivitäten) repräsentieren. Dargestellt würde somit beispielweise welche produktbezogenen Systemstrukturen zu einem Meilenstein vorliegen müssten, um eine Absicherungsaktivität durchführen zu können. Hierdurch könnte ebenfalls verdeutlicht werden, welche Personen oder Abteilungen zu einem Meilenstein miteinander kommunizieren müssten.

Einen anderen Anwendungsbereich der Darstellung von Zeitvariabilitäten durch mehrere Ebenen zeigt die Firma ATA auf ihrer Homepage (siehe Abbildung 8-11) (vgl. [SKYE BENDER-DEMOLL & MCFARLAND 2006]). Zu sehen sind die Jahre 2003, 2004 und 2005. Jede Ebene stellt hypothetische Kommunikationsstrukturen von Personen dar, die mit den Terroranschlägen von Madrid in Verbindung gebracht werden. Die Personenzusammensetzung sowie die Kommunikationsverbindungen und die Intensität der Kommunikation verändern sich. Jeder Zeitpunkt, der durch eine Ebene in 3D-MECHGRAPH repräsentiert werden soll, benötigt eine zugehörige Matrix, in der die Struktur für diesen Zeitpunkt definiert ist.

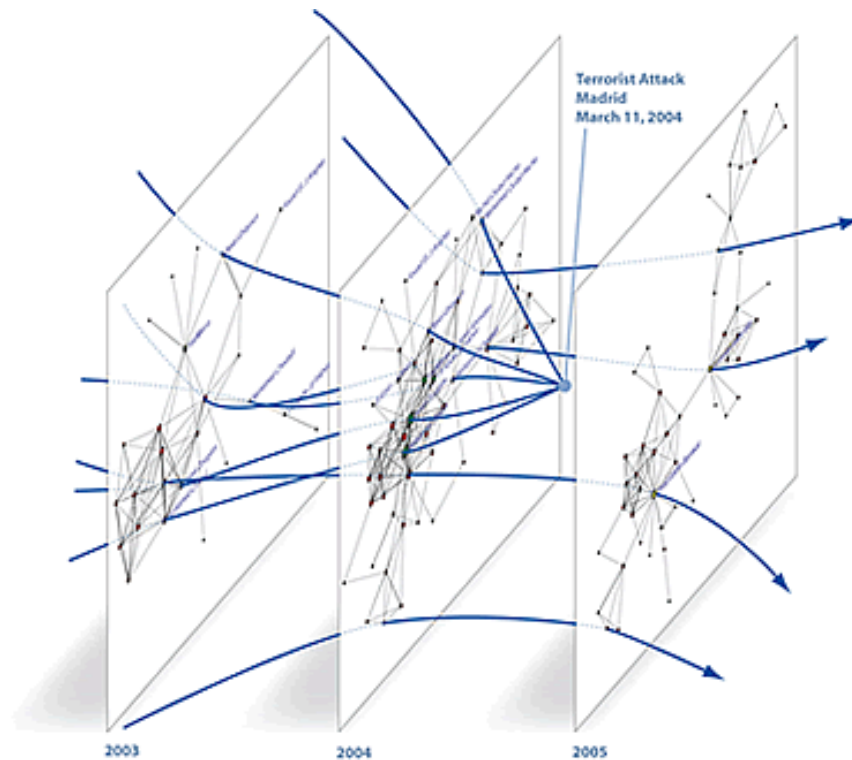


Abbildung 8-11: Grafik zur Verdeutlichung der zeitlichen Dynamik von Netzwerken in Bezug auf die Anschläge von Madrid [ATA 2008]⁵

Der zweite mögliche Visualisierungsansatz für die Darstellung von Zeitvariabilitäten in 3D-MECHGRAPH stellt eine Animation der Veränderungen dar. Hierzu müssen entweder die durch die einzelnen Zeitpunktmatrizen definierten Strukturen mit Hilfe eines Morphingprogrammes⁶ ineinander überführt werden, oder es muss die Kopplung mit einer weiteren Datenquelle erfolgen. Letzteres wurde für die Visualisierung von Energieflüssen in einem Automobil realisiert (siehe Abbildung 8-12). Die elektrischen, mechanischen und thermischen Energieflüsse wurden entweder durch Versuchsfahrten gemessen oder durch aufwändige Simulationsprogramme berechnet. Die Daten liegen entsprechend in den Programmen Dymola und Matlab vor.

⁵ Die Abbildung stellt eine Grafik dar und nicht einen Screenshot eines Visualisierungstools.

⁶ „Morphing ist ein computergenerierter Spezialeffekt bei Ton- oder Bildaufzeichnungen. Beim Morphing werden zwischen zwei Einzelbildern bzw. zwei Klängen Zwischenübergänge berechnet.“ [WIKIPEDIA 2008B]

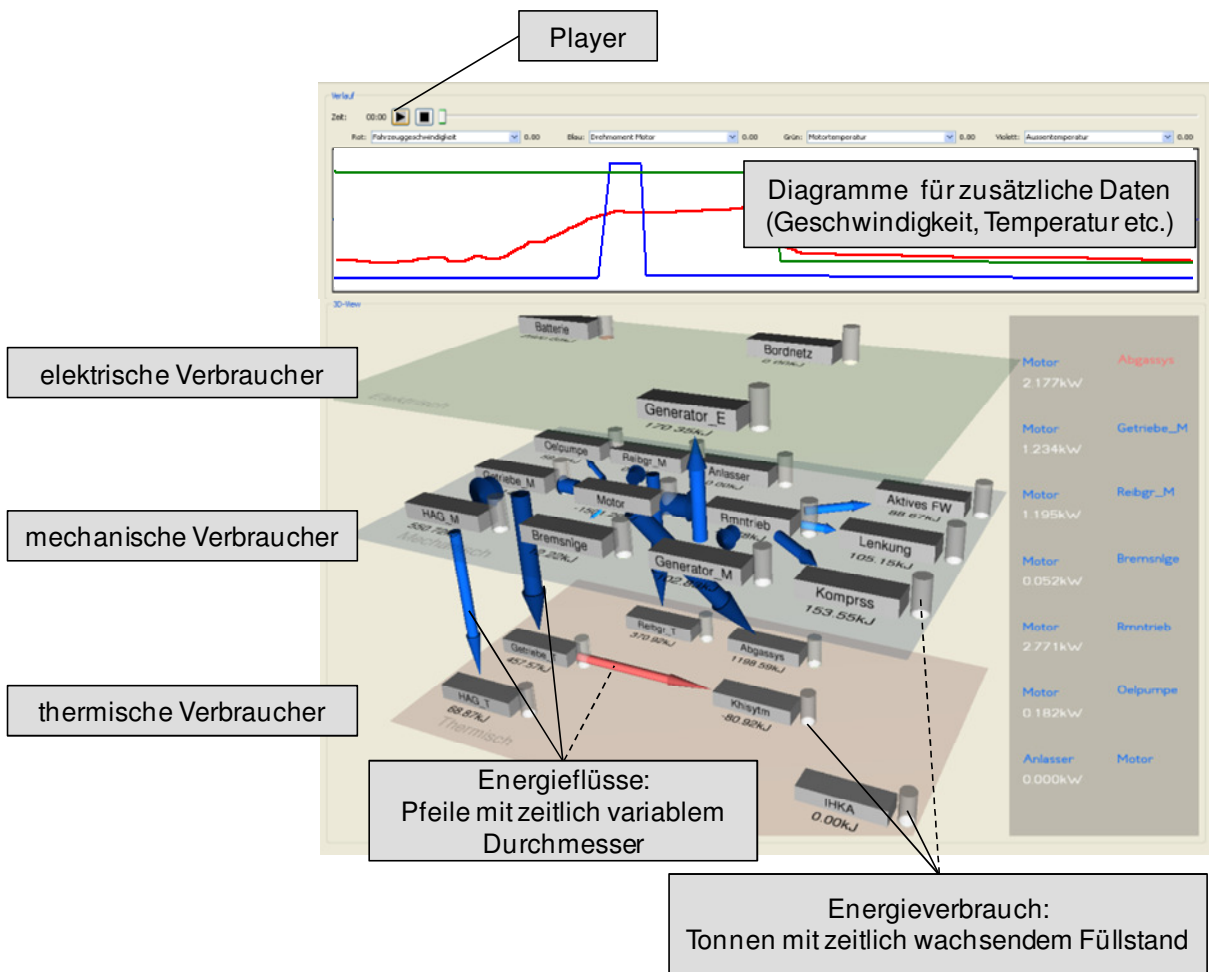


Abbildung 8-12: Anpassung von 3D-MECHGRAPH auf die dynamische Visualisierung von Energieflüssen im Automobil [TU-MÜNCHEN 2007]

Die einzelnen Ebenen in Abbildung 8-12 repräsentieren die Energiearten elektrisch, mechanisch und thermisch. Verbraucher sind in Form von Kästchen auf diesen Ebenen positioniert. Die Relationen zwischen den einzelnen Verbrauchern wurden über eine Matrix definiert und in der Konfigurationsdatei festgehalten. Relationen entsprechen in diesem Fall prinzipiell möglicher Energieflüsse. Als Verknüpfungsstärke wird der aktuelle Energiefluss interpretiert. Dieser kann für die einzelnen Verbraucher aus einer Matlab-Matrix mit festgelegtem Aufbau ausgelesen werden. In der angesprochenen Matlab-Matrix sind die einzelnen Verbraucher in den Spalten nacheinander aufgeführt. Jede Zeile der Matrix entspricht einem Zeitpunkt, so dass sich in den Zellen der jeweilige aktuelle Leistungsfluss zusammen mit dem kumulierten Wert über die verstrichene Zeit findet (aufgenommene Energie). In Abhängigkeit der durchgeführten Mess- und Simulationsverfahren, kann die zeitliche Auflösung der Matlab-Matrix bis in den Millisekundenbereich eingestellt werden. Der aktuelle Leistungsfluss wird im abgebildeten Konzept durch eine variable Dicke der

Verbindungsvektoren visualisiert. Darüber hinaus wird in den Tonnen der kumulierte Wert durch einen langsam wachsenden Füllstand repräsentiert. Dabei wurde die Höhe der Tonne gleich dem gesamten Energieverbrauch aller Verbraucher über die gesamte Messfahrt gesetzt. Hierdurch können schnell die Hauptverbraucher identifiziert werden.

Zur Steuerung der Animation wurde 3D-MECHGRAPH um einen Player mit Start-/Stopknopf und Zeitleiste erweitert. Im Feld darunter können Graphen zusätzlich gemessener Werte wie zum Beispiel Fahrzeuggeschwindigkeit, Motordrehmoment, Außentemperatur angezeigt werden. Das seitliche Head Up Display wurde ebenfalls angepasst und zeigt für selektierte Verbraucher die Energiedaten in digitaler Form an.

Zusammenfassend stellt die beschriebene Spezialanwendung eine Möglichkeit dar, zeitliche Veränderungen animiert zu visualisieren. Durch das Beispiel soll aufgezeigt werden, dass weitere Anwendungsmöglichkeiten bei einer Kombination der klassischen matrixbasierten Herangehensweise mit zusätzlichen Datenquellen entstehen.

8.4 Evaluation von 3D-MECHGRAPH

8.4.1 Evaluationsrahmen

3D-MECHGRAPH wurde im Rahmen der Entwicklung der multikinematischen Tür mit teil- und vollautomatischer Öffnungsfunktionen in einem iterativen Zyklus aus Lösungsentwicklung, Anwendung, und Optimierung schrittweise verfeinert. Der hierdurch entwickelte Stand von 3D-MECHGRAPH wurde anschließend im Rahmen eines Anwendungsworkshops evaluiert sowie auf einem internationalen Mechatronikworkshop präsentiert und zur Diskussion gestellt [DIEHL ET AL. 2008]. Hierauf aufbauend wurden Anwendungs- und Verbesserungspotentiale abgeleitet, die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden.

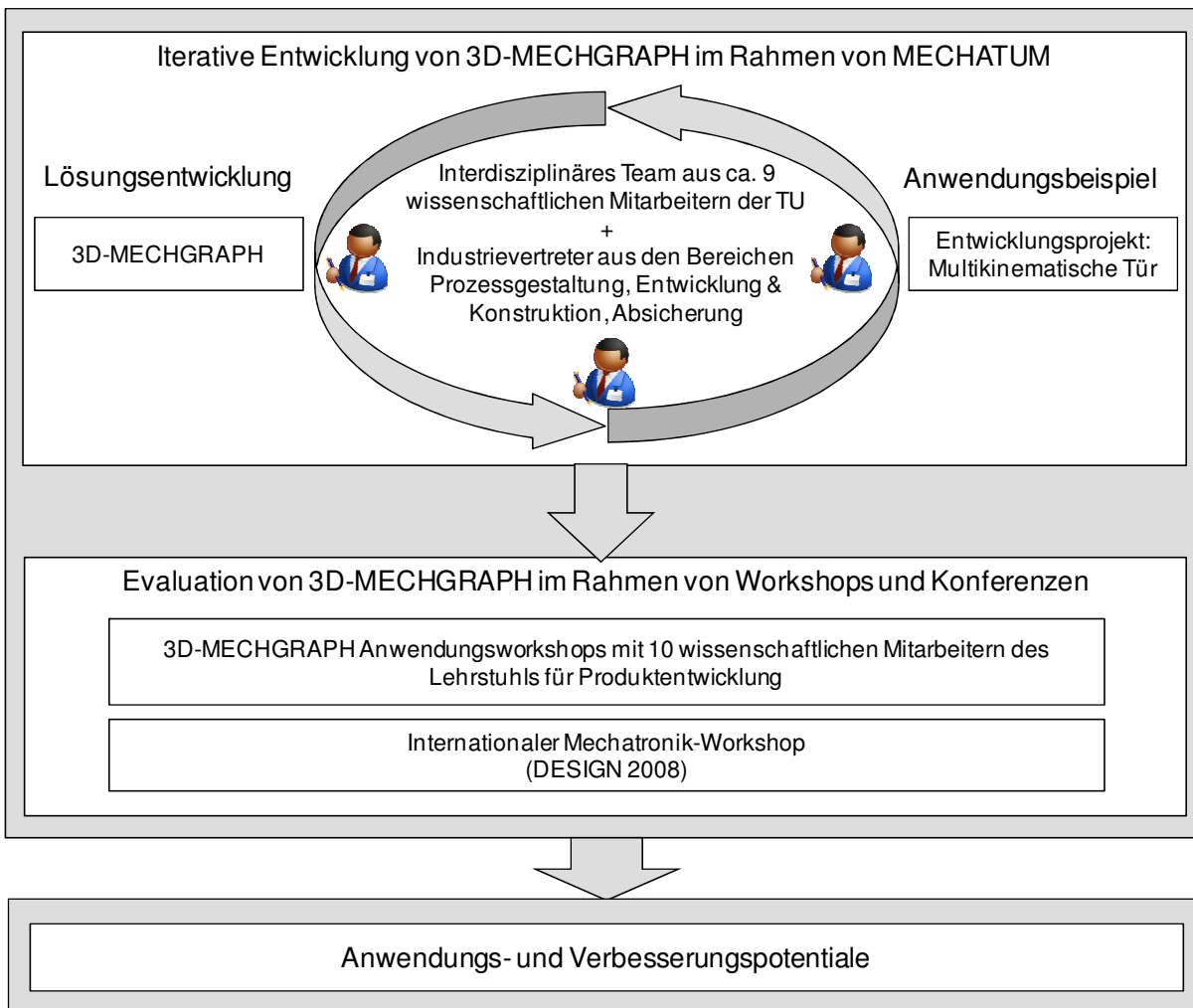


Abbildung 8-13: Iterative Entwicklung und anschließende Evaluation von 3D-MECHGRAPH

Der Anwendungsworkshop zur Evaluation von 3D-MECHGRAPH wurde mit 10 wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Produktentwicklung der TU-München durchgeführt. In Persona der Workshopteilnehmer waren Experten aus den Forschungsbereichen Energiemanagement, Prozessmanagement, Kostenmanagement, Baukastenentwicklung, Produktpiraterie, Komplexitätsmanagement, Mechatronik, Innovationsmanagement, Lean Management und Variantenmanagement vertreten. Hierdurch wurden unterschiedliche Sichten auf die Interpretation domänenübergreifender Strukturen eingebracht und eine kritische Reflektion des Funktionsumfanges von 3D-MECHGRAPH sichergestellt.

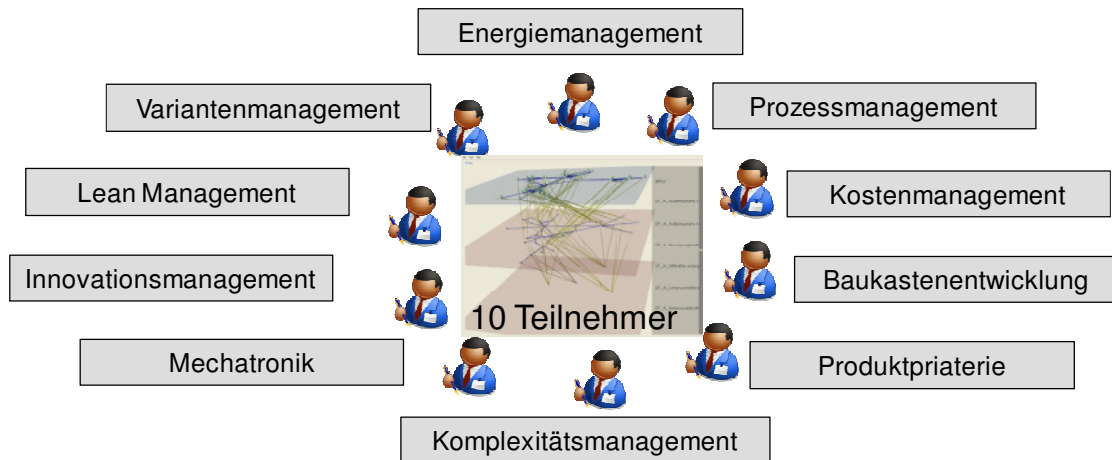


Abbildung 8-14: Anwendungsworkshop: vertretene Experten

Im Rahmen des Workshops wurde zunächst eine grundsätzliche Einführung in Bezug auf die Funktionalitäten und den Aufbau von 3D-MECHGRAPH gegeben. Anschließend wurden diese Funktionalitäten durch zwei interaktive Anwendungsbeispiele verdeutlicht. In Anwendungsbeispiel Nummer 1 wurde aufgezeigt, wie mit Hilfe der Selektions- und Strukturnavigationsfunktionalitäten notwendige Abstimmungspartner bei Änderung eines spezifischen Systemelementes identifiziert werden können. Zur Beantwortung dieser Fragestellung war eine Analyse zwischen den zwei Domänen Systemelemente und Personen notwendig. Mit Hilfe der Selektionsfunktion (Anklicken eines Elementes) wurde hierzu im ersten Schritt identifiziert, welches direkte Nachbarelemente zu dem betreffenden Systemelement sind und somit bei einer Änderung beachtet werden sollten. Anschließend wurde für jedes dieser Systemelemente wiederum mit Hilfe der Selektionsfunktion nachvollzogen, wer hierfür die Verantwortung trägt, um hierdurch das Abstimmungsteam abzuleiten. Die Hauptinteraktionsschritte dieses Anwendungsbeispiels sind in folgender Abbildung dargestellt.

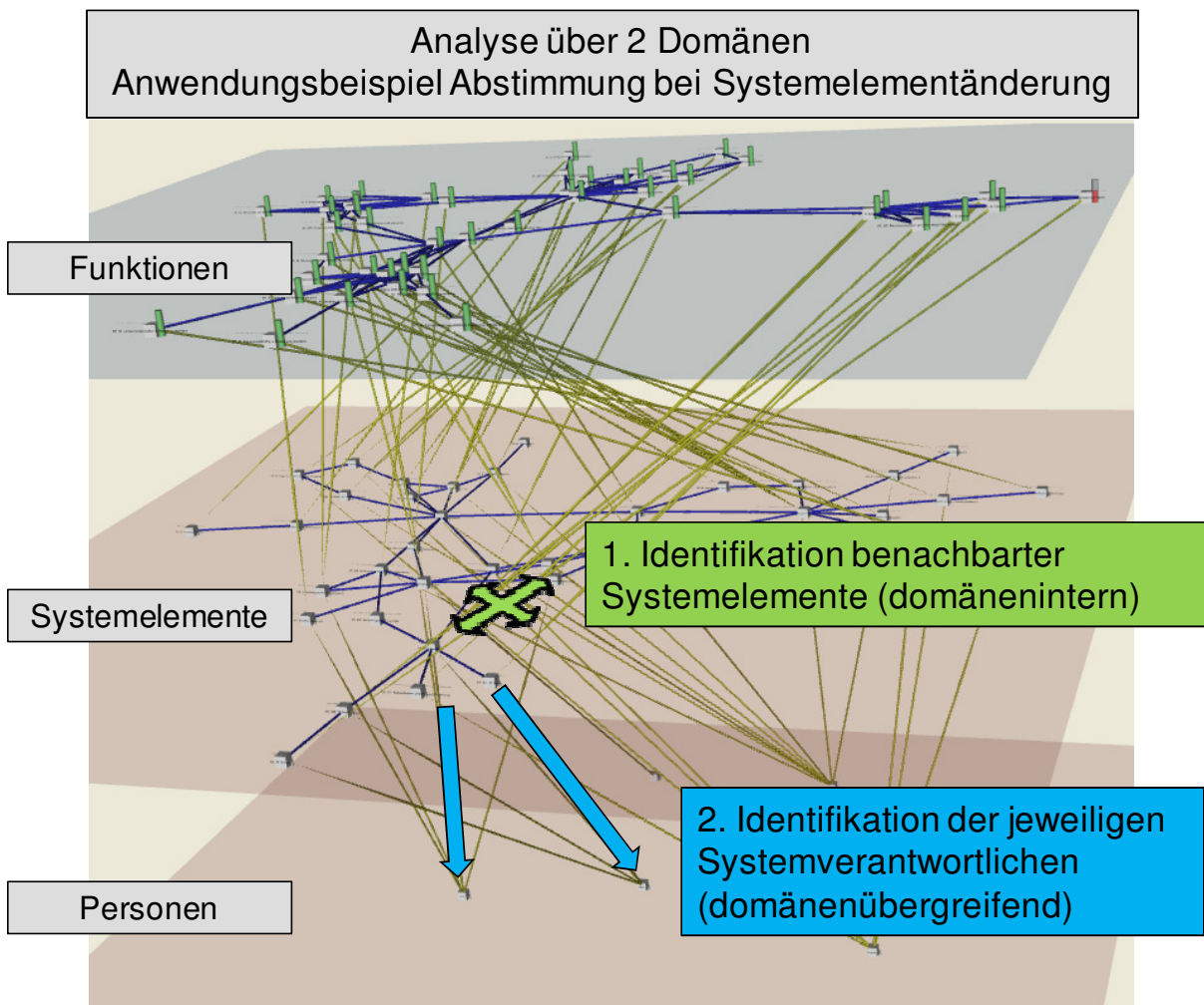


Abbildung 8-15: Anwendungsbeispiel 1: Interaktive Identifikation notwendiger Abstimmung bei Änderung eines Systemelementes

In Anwendungsbeispiel Nummer 2 wurde zusätzlich vorgeführt, wie interaktiv über drei Domänen hinweg die Fragestellung beantwortet werden kann, wer sich bei Änderung einer spezifischen Funktion abstimmen sollte. Hierzu mussten analog zu Beispiel 1 mit Hilfe der Selektionsfunktion die direkten Nachbarfunktionen der entsprechenden Funktion identifiziert werden. Anschließend erfolgte die interaktive Ermittlung der jeweiligen funktionsrealisierenden Systemelemente. Für diese wurden dann die jeweiligen Verantwortlichen, die somit auch die gesuchten Funktionsverantwortlichen darstellen, identifiziert. Die Interaktionsschritte des zweiten Anwendungsbeispiels sind in Abbildung 8-16 zu sehen.

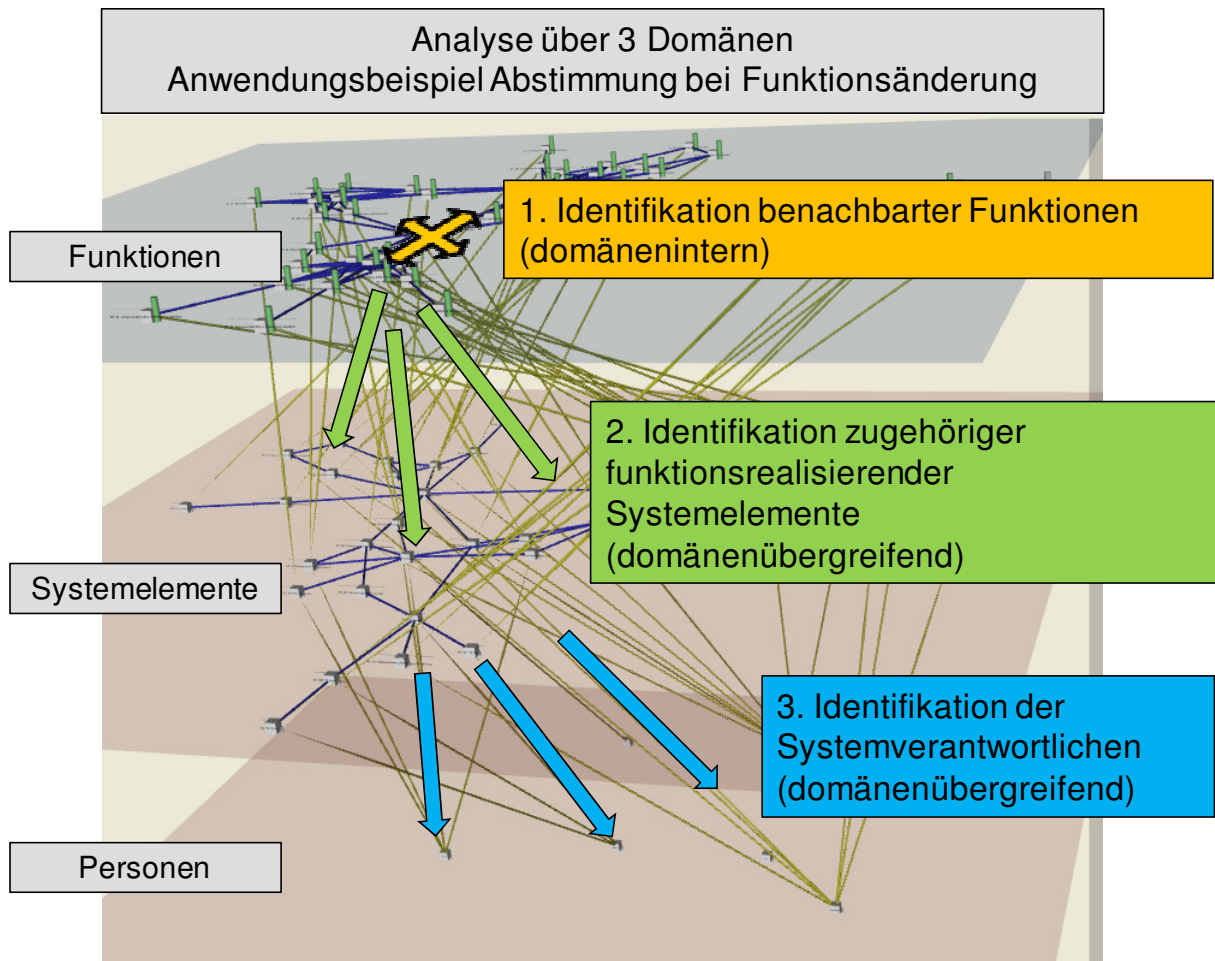


Abbildung 8-16 : Anwendungsbeispiel 2: Interaktive Identifikation notwendiger Abstimmung bei Änderung einer Funktion

Neben der Vorführung der Anwendungsbeispiele hatten die Workshopteilnehmer die Möglichkeit an einem Rechner die Funktionalitäten selbst zu testen. Anschließend wurden in einem Brainstorming Verbesserungspotentiale für die in folgender Abbildung dargestellten Bereiche identifiziert und zugehörige Verbesserungskonzepte gesammelt.

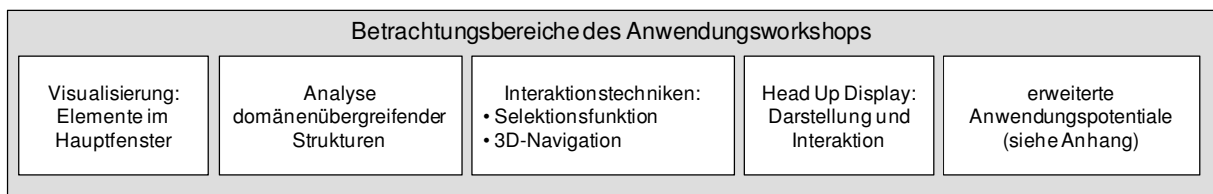


Abbildung 8-17: Betrachtungsbereiche des Anwendungworkshops

Wie bereits erwähnt, wurde 3D-MECHGRAPH zusätzlich auf dem Mechatronikworkshop der Design-Konferenz 2008 internationalen Experten präsentiert und zur Diskussion gestellt [DIEHL ET AL 2008]. Geleitet wurde der Workshop durch Professor Stefan Möhringer. Folgende Fragen wurden in diesem Workshop explizit mit den Teilnehmern diskutiert:

- Kann die gezeigte 3D-Visualisierung das interdisziplinäre Systemverständnis fördern und hierdurch den mechatronischen Produktentwicklungsprozess unterstützen?
- Welches sind Defizite der gezeigten 3D-Visualisierung?
- Welche zusätzlichen Funktionen sollten implementiert werden?

Allgemein wurde durch die Workshopteilnehmer ein positiver Beitrag von 3D-MECHGRAPH zur Unterstützung des mechatronischen Produktentwicklungsprozesses anerkannt. Die hohe Flexibilität bei der Festlegung von Betrachtungsbereichen und deren Repräsentation durch Ebenen wurde in diesem Rahmen besonders positiv hervorgehoben. Darüber hinaus wurde die hohe Relevanz der Visualisierung der domänenübergreifenden Vernetzung von Funktionen, Systemelementen und Personen zur Förderung des interdisziplinären Systemverständnisses durch die Teilnehmer bestätigt. In der Visualisierung von elementbezogenen Kennzahlen wurde ein erheblicher Fortschritt zur einfacheren Analyse von domänenspezifischen Strukturen und der dadurch möglichen Identifizierung von Schwerpunkten erkannt. Dies betrifft insbesondere die Darstellung des Projektfortschritts durch Tonnen und Farbschemata in der zu realisierenden Struktur.

Die im Rahmen des Anwendungsworkshops- sowie des Mechatronikworkshops geäußerten Verbesserungsvorschläge wurden gesammelt, bewertet und ausgearbeitet. In den folgenden Kapiteln werden die vielversprechendsten Verbesserungskonzepte vorgestellt. Zusätzliche interessante Anwendungsideen und -konzepte für 3D-MECHGRAPH finden sich im Anhang.

8.4.2 Identifizierte Verbesserungspotentiale der Visualisierung

Durch viele Teilnehmer der Workshops wurde zwar die Anzeige von selektierten Objekten im seitlichen Head Up Display gelobt, jedoch auch der Wunsch der direkten Lesbarkeit von Elementbeschriftungen im Hauptfenster geäußert. So empfanden die Workshopteilnehmer, dass zu viel Zeit für die interaktive dreidimensionale Navigation verwendet werden muss, um gezielt einzelne Beschriftungen zu vergrößern.

Dieser Kritikpunkt deutet einen Konflikt zwischen der Erkennbarkeit des strukturellen Gesamtzusammenhangs und der Lesbarkeit einzelner Elemente an. Jedoch wurden im Bereich der Gestaltung von Softwareinterfaces verschiedene Darstellungstechniken entwickelt, die Lösungsmöglichkeiten für dieses Problem bieten können. Ein sehr bekanntes Beispiel hierfür sind Fischaugendarstellungen, wie sie beispielsweise im Betriebssystem OSX der Firma Apple verwendet werden. Die einzelnen graphischen Objekte einer Liste werden zunächst verkleinert dargestellt. Sobald jedoch der Mauszeiger über einem der Objekte positioniert wird (sogenannter Mouseover-Zustand), erfolgt eine vergrößerte Darstellung entsprechend dem eingestellten Linseneffekt.



Abbildung 8-18: Fischaugenmenü [N.DESIGNSTUDIO 2008]

Die Darstellungstechniken, lassen sich auf die 3D-Welt übertragen, so dass bei einem „Mouse Over Zustand“ der Text der entsprechenden Elemente oder das gesamte Element vergrößert dargestellt wird. Die durch OpenSceneGraph bereits mitgelieferten Kollisionsfunktionen und sogenannte „Switchknoten“⁷ ermöglichen eine einfache Umsetzung entsprechender Vergrößerungstechniken. Alternativ kann ein zweiter Viewpoint⁸ definiert werden, der wie ein Vergrößerungsglas den Bereich um den Cursor herum vergrößert darstellt. Auch eine vergrößerte Anzeige der Beschriftung eines Elementes bei Kollision der Mauszeigerposition mit dem Element in einem separaten Teilfenster kann eine effektive Lösung darstellen.

8.4.3 Identifizierte Verbesserungspotentiale der Analyseunterstützung domänenübergreifender Strukturen

In stärkerbasierten Graphen wird die Analyse struktureller Merkmale durch die automatische Anordnung der Elemente unterstützt. Elemente die keine Verknüpfung aufweisen stoßen sich dabei ab und Elemente die Verknüpfungen aufweisen, ziehen sich an. Hierdurch können unter anderem Cluster in Form von eng vernetzten Bereichen, Brückenelemente oder Kreisschlüsse erkannt werden. MAURER beschäftigt sich intensiv mit den einzelnen Strukturkriterien in Bezug auf domäneninterne Vernetzungen [MAURER 2007, S.199 ff].

Ein entsprechendes Pendant für komplette MDM-Strukturen (mehrere Domänen), wie sie durch 3D-MECHGRAPH visualisiert werden, existiert bis dato nicht. Daher wurde im Rahmen des Anwendungsworkshops intensiv diskutiert, wie die Analyse domänenübergreifender Strukturen durch eine angepasste Ausrichtungslogik unterstützt werden kann. Zu beantworten war, auf welche Art und Weise sich Relationen zwischen den Domänen auf die Position der einzelnen Elemente innerhalb ihrer Domäne auswirken. Der in dieser Arbeit dargestellte Entwicklungsstand von 3D-MECHGRAPH berücksichtigt diesen

⁷ Über Switchknoten können im Szenengraph Fälle definiert werden, in deren Abhängigkeit die unter diesem Knoten hängenden Geometrieknoten gerendert werden oder nicht. Somit kann beispielsweise zwischen einer vergrößerten und einer verkleinerten Darstellung eines Objektes in Abhängigkeit der Mausposition gewechselt werden.

⁸ Viewpoints werden in Szenengraphen benutzt, um den zu rendernden Blickwinkel auf die 3D-Welt zu definieren. Es ist möglich mehr als einen Blickwinkel zu festzulegen, um beispielsweise die Spiegelung in einem Autorückspiegel für einen Fahrsimulator zu berechnen.

Aspekt nicht. Die stärkebasierten Graphen wurden für die einzelnen Domänen getrennt berechnet und auf einzelnen Ebenen im 3D-Raum abgebildet. Anschließend wurden die einzelnen Elemente in Abhängigkeit der in den Domänenverknüpfungsmatrizen aufgeführten Relationen mit Vektoren verbunden (siehe Kapitel 8.3.1).

Folgend sollen die vielversprechendsten theoretischen Ansätze, die die in den Domänenverknüpfungsmatrizen aufgeführten Abhängigkeiten bei der Berechnung der domänenspezifischen Elementanordnung berücksichtigen, vorgestellt werden. Im ersten Fall werden zwei oder mehr Domänen in einer DSM zusammengefasst, um daraus einen stärkebasierten Graphen zu berechnen, der alle Elemente aller Domänen beinhaltet. Die unterschiedliche Domänenzugehörigkeit wird somit vernachlässigt. Im nächsten Schritt wird in 3D-MECHGRAPH für jede Domäne eine Ebene erzeugt und der berechnete Gesamtgraph in Abhängigkeit der eigentlichen Domänenzugehörigkeit der einzelnen Elemente aufgefächert (siehe Abbildung 8-19). Somit ergibt sich eine völlig andere domäneninterne Strukturdarstellung, als wenn für jede Domäne einzeln ein stärkebasierter Graph berechnet worden wäre. Die domäneninterne Strukturanalyse ist somit nicht mehr in gleicher Weise durch die Positionierung der Einzelelemente unterstützt.

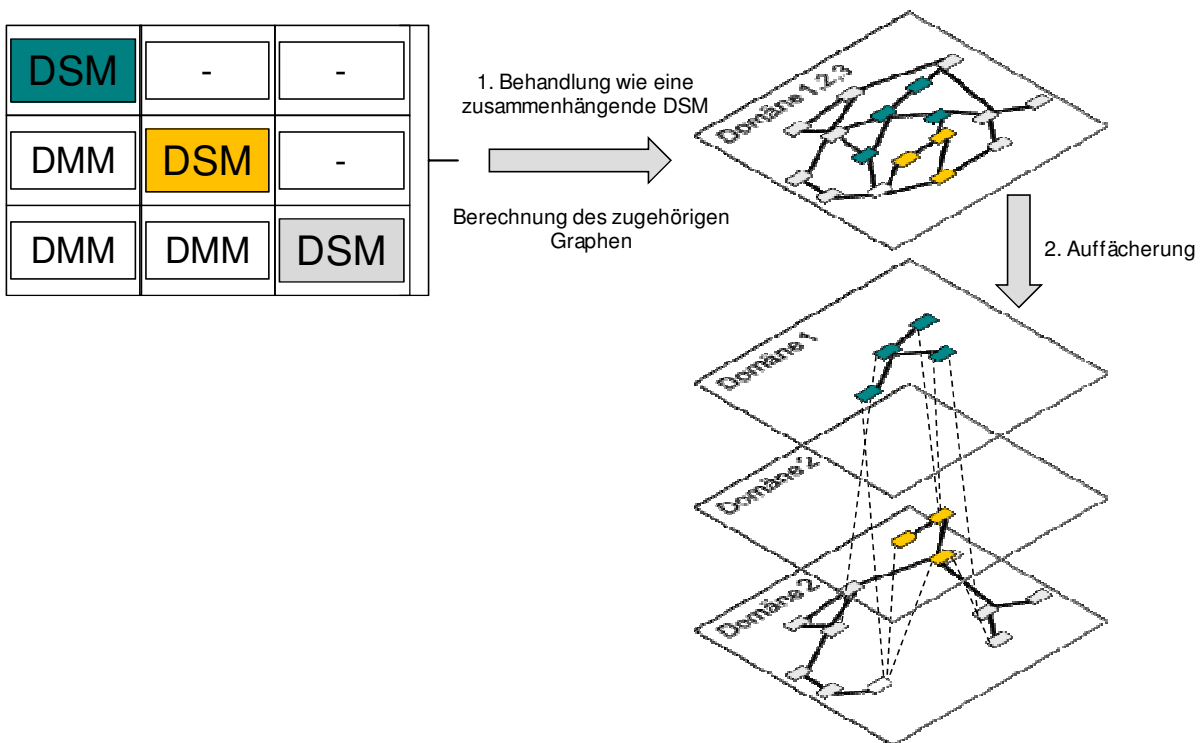


Abbildung 8-19: Möglichkeit 1: Auffächerung eines Graphen

Ein anderer Ansatz stellt die Einbeziehung der Anziehungskraft domänenübergreifender Verbindungen dar. Dabei versuchen sich Elemente unterschiedlicher Domänen, die eine Verbindung miteinander aufweisen, so auszurichten, dass sich der Verbindungsvektor dem optimalen Zustand eines Lots nähert. Dies erfolgt jedoch unter dem gleichzeitigen

Krafteinfluss der domäneninternen Anziehungs- und Abstoßungskräfte. Die entstehenden Strukturen spiegeln das neue Kräftegleichgewicht wieder. Zu erwarten ist, dass durch einen solchen Ausrichtungsalgorithmus domänenübergreifende Strukturähnlichkeiten wie beispielsweise domänenübergreifende Cluster sichtbar werden. Einen Spezialfall hierzu stellen Domänen dar, deren interne Verknüpfungen gänzlich ausgeblendet werden. Die Ausrichtung der Elemente einer solchen Ebene ist somit ausschließlich durch die Anziehungskraft der domänenübergreifenden Verknüpfungen bestimmt. Auch in diesem Fall erwartet der Autor, dass das Ergebnis der Ausrichtung sich herauskristallisierende Cluster sind, die beispielsweise Hinweise auf sinnvolle Umstrukturierungen in Bezug auf Organisationsstrukturen geben können. In beiden Fällen besteht ein entscheidender Unterschied, ob nur Verknüpfungen zu einer oder ob Verknüpfungen zwischen mehreren Domänen betrachtet beziehungsweise beachtet werden. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll Interaktionsfunktionen zu implementieren, die eine Definition der bei der Ausrichtungsberechnung zu beachtenden Domänenpaarungen erlauben. Die Interaktionsfunktionen sollten ebenfalls ein interaktives Ein- und Ausschalten der domäneninternen Verknüpfungen erlauben. Zu klären ist, in welchem Maße die domänenübergreifenden Kräfte wirken, ob also eine Gewichtung dieser Kräfte sinnvoll und notwendig ist.

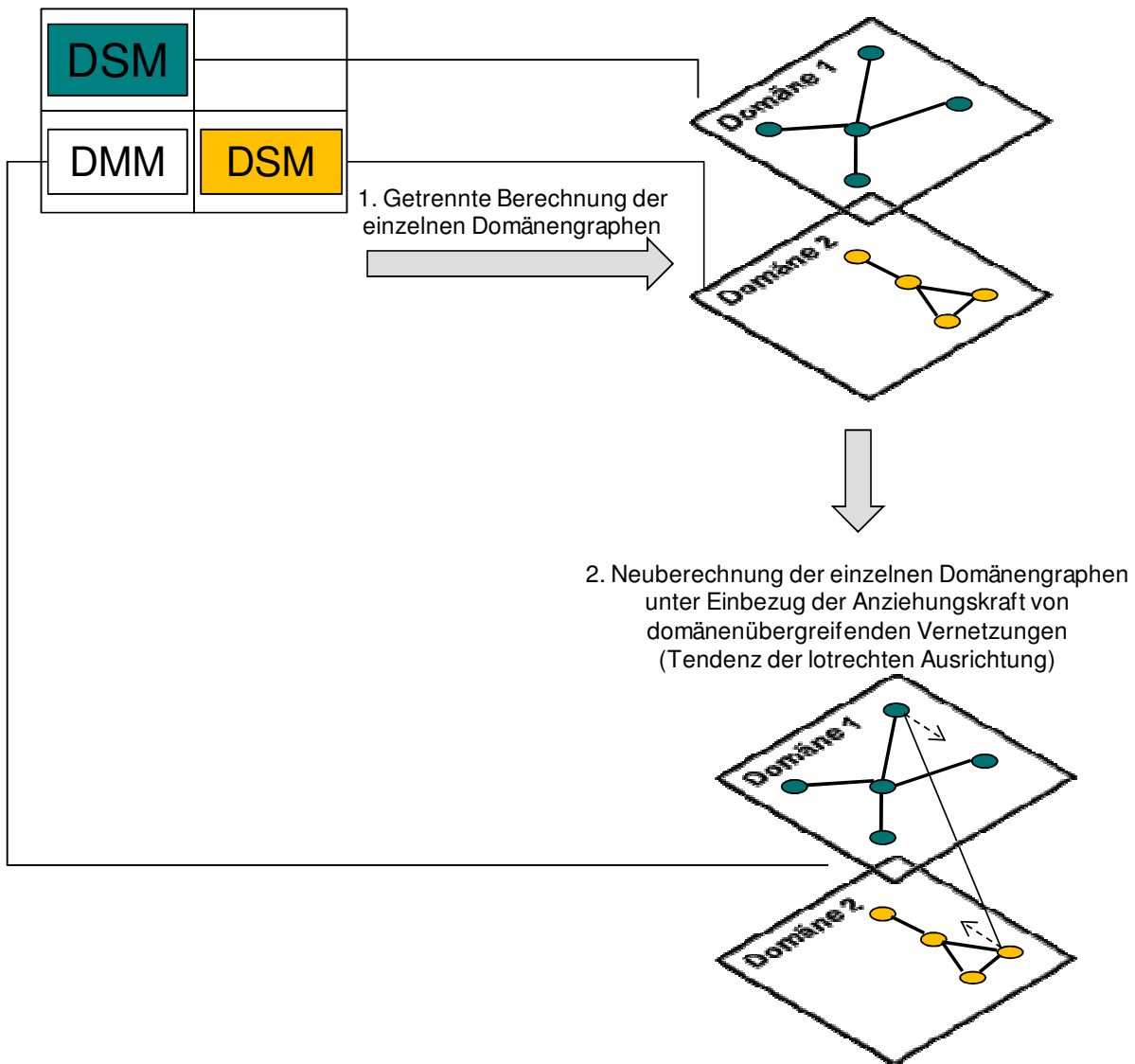


Abbildung 8-20: Möglichkeit 2: Einbezug der Anziehungskraft domänenübergreifender Vernetzungen

Eine Abwandlung, zu der in Abbildung 8-20 dargestellten Möglichkeit, stellt die Berechnung der vertikalen Anziehungskräfte und die entsprechende Ausrichtung der Elemente in vertikaler Richtung dar. Die einzelnen Elemente mit domänenübergreifenden Relationen weisen somit zwar die gleichen X, Y Koordinaten im lokalen Koordinatensystem der entsprechenden Ebene auf, besitzen jedoch eine Z-Position ungleich null. Sie werden also durch die vertikalen Kräfte der domänenübergreifenden Relationen aus der Ebene herausgezogen (außer wenn sich positive und negative Kräfte ausgleichen). In einer auf diese Weise generierten Darstellung stechen Elemente, die viele domänenübergreifende Relationen aufweisen durch ihre Z-Position hervor.

8.4.4 Identifizierte Verbesserungspotentiale der Interaktivität

Während der Evaluierung von 3D-MECHGRAPH konnte der Bedarf für zusätzliche Interaktionsfunktionen identifiziert werden. Hierzu zählt die interaktive Einstellbarkeit einiger bereits über die Konfigurationsdatei festgelegten Werte. So sollte eine Funktion implementiert werden, die es erlaubt interaktiv den Abstand der Ebenen einzustellen. Eine Erweiterung hierzu stellt die Vertauschung der Ebenenreihenfolge dar. Hierdurch könnten gezielter spezifische Domänenpaarungen untersucht werden. Sinnvoll erschien einigen Teilnehmern auch die Einbettung einer Funktion zur interaktiven Verknüpfung von Elementen. Dies würde helfen in interdisziplinären Diskussionen schnell Änderungen direkt in der betrachteten Struktur vorzunehmen, ohne dass ein umständlicher Wechsel des Mediums erforderlich wäre. Weitere Parameter der Konfigurationsdatei wie beispielsweise die Textgröße oder Skalierungsfaktoren für die Elementkästchen und Tonnen sollten in einer erweiterten Version über Menüs einstellbar sein.

Für die Beschleunigung des interaktiven Nachvollzugs von strukturellen Abhängigkeiten (vgl. Anwendungsbeispiel), sollte nach Ansicht einiger Workshopteilnehmer die Selektionsfunktion so erweitert werden, dass bei gedrückter Steuerungstaste mehrere Elemente gleichzeitig selektiert werden können. In diesem Kontext erscheint es sehr sinnvoll die Navigationstiefe ebenfalls interaktiv einstellbar zu gestalten. Zusätzlich sollte neben einem vollkommenen Ausblenden der restlichen Struktur eine farbliche Hervorhebung der selektierten Teilstruktur getestet werden. Dies würde eine bessere Einordnung der Teilstruktur in den Gesamtzusammenhang ermöglichen.

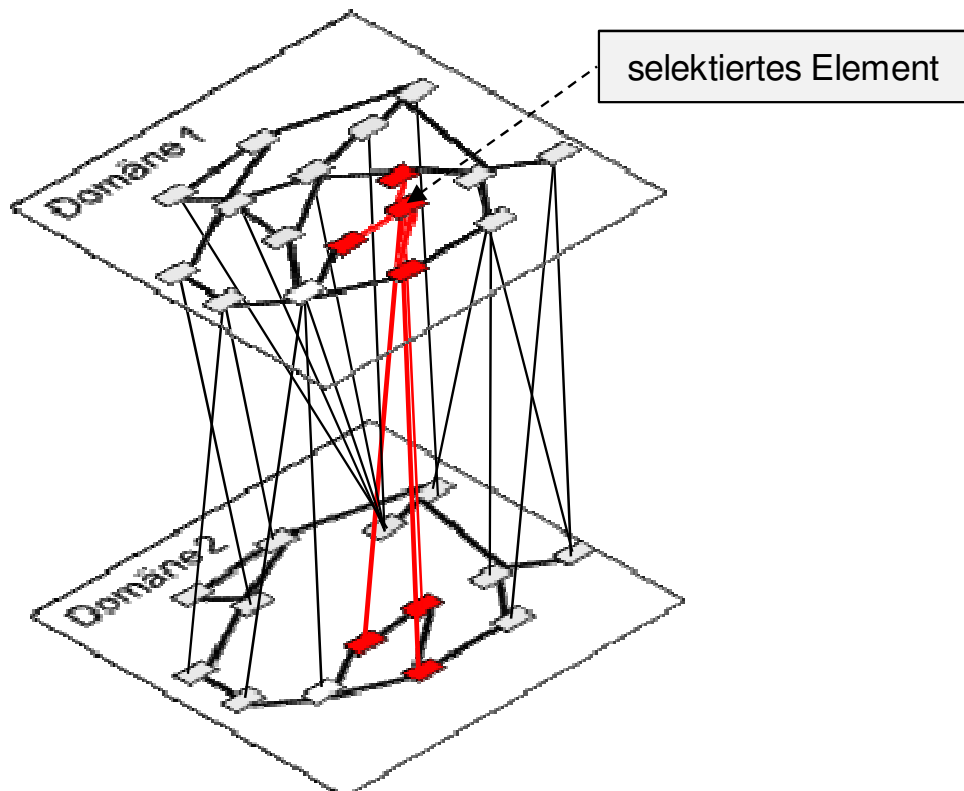


Abbildung 8-21: Farbliche Hervorhebung von selektierten Teilstrukturen

Weitere sinnvolle Erweiterungen in Bezug auf die Interaktivität und Darstellung von domänenübergreifenden Strukturen finden sich im Bereich der Informationsvisualisierung. So nutzen COLLINS & SHEELAGH [2007] gebündelte Graphen um die Übersichtlichkeit zu verbessern.

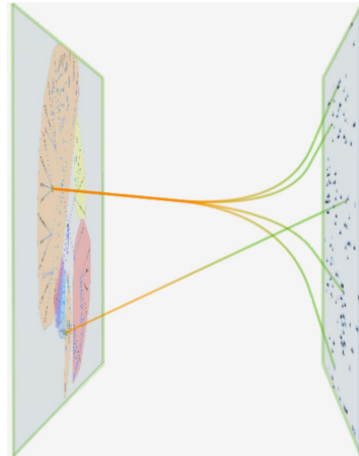


Abbildung 8-22: Bündelung domänenübergreifender Graphen [COLLINS & SHEELAGH 2007]

8.4.5 Identifizierte Verbesserungspotentiale des Head Up Displays

Über das seitliche Head Up Display können im diskutierten Entwicklungsstand von 3D-MECHGRAPH Elemente selektiert werden, um deren Vernetzung mit der direkten Nachbarschaft zu analysieren. Zusätzlich wird bei Selektion eines Elementes durch einen Klick auf das entsprechende Kästchen im 3D-Fenster der zugehörige Name im Head Up Display hervorgehoben. Diese Funktionen wurden von den Workshopteilnehmern als sehr hilfreich empfunden, jedoch wurde betont, dass eine strukturiertere Darstellung der Elemente im Head Up Display weitere Vorteile generieren würde. Wie in Abbildung 8-5 zu erkennen, werden die einzelnen Elemente in Form einer unstrukturierten Scroll-Liste aufgeführt. Eine gefilterte Auflistung nach Domänenzugehörigkeit würde bereits eine gezieltere und somit schnellere Auswahl von Elementen ermöglichen. Ein entsprechender Erweiterungsvorschlag ist in Abbildung 8-23 zu sehen. Das dort dargestellte Head Up Display weist drei zusätzliche Teilfenster auf. Im obersten Teilfenster findet sich eine Liste der prinzipiell anzeigbaren Domänen. Die einzelnen Domänen können durch einen Klick auf das entsprechende Feld aktiviert oder deaktiviert werden. In der Abbildung sind die Domänen Elementarfunktionen (EF), Systemelemente (SE) und Personen (P) selektiert. Nicht dargestellt werden die Domänen Teilfunktionen (TF) und Dokumente (D). Im zweiten Teilfenster von oben, wird ausgewählt, für welche der angezeigten Domänen die zugehörigen Elemente im Feld darunter aufgelistet werden sollten. Zusätzlich kann ein Eingabefeld für eine textuelle Suche nach Elementen integriert werden. Die im vorherigen Kapitel geforderte Möglichkeit der

interaktiven Selektion mehrerer Elemente sollte auch für die Auswahl über das Head Up Display übernommen werden.

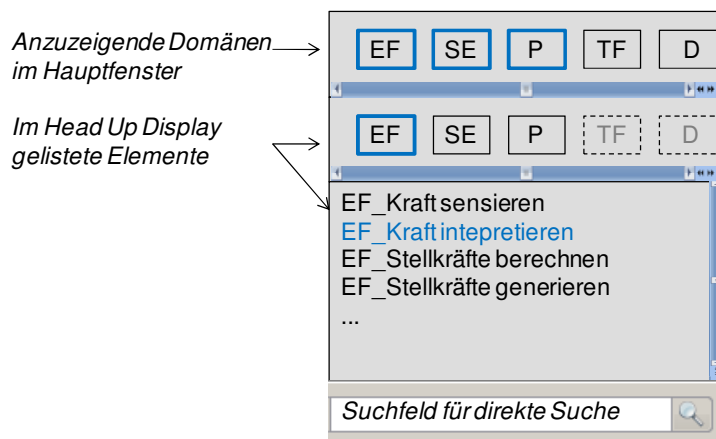


Abbildung 8-23: Konzept für ein erweitertes Head Up Display

8.5 Zusammenfassung

Ein zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Verbesserung des interdisziplinären Systemverständnisses im Serienentwicklungsprozess mechatronisch geprägter Automobilsysteme zu leisten. Hierfür wurde in Kapitel 7 ein methodisches Vorgehen erarbeitet, um die Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Betrachtungsdomänen Funktionen, Systemelemente und Personen methodisch herzuleiten. Die umfangreichen Daten des integrierten Produktmodells wurden durch Matrizen in eine einheitliche Form gebracht. Da jedoch bestehende Visualisierungsansätze in Form von stärkebasierten Graphen, sowie in der Literatur zu findende Ansätze nicht ausreichend geeignet sind, um die disziplin- und domänenübergreifenden Abhängigkeiten transparent darzustellen, wurde ein neues Tool genannt 3D-MECHGRAPH entwickelt. Das entstandene dreidimensionale Visualisierungswerkzeug erlaubt es interaktiv und ohne besondere Vorkenntnisse domänen- und disziplinübergreifende Strukturen nachzuvollziehen [DIEHL ET AL. 2008]. Fragestellungen, die hierdurch beantwortet werden können, sind insbesondere:

- Welche Funktionen werden durch welche Systemelemente realisiert?
- Wer bearbeitet / verantwortet welche Funktionen und Systemelemente?
- Welche Abhängigkeiten bestehen innerhalb der Bereiche Funktionen und Systemelemente?

3D-MECHGRAPH wurde im Rahmen des Projektes MechaTUM eingesetzt und in einem gezielten Anwendungsworkshop sowie auf einem internationalen Mechatronikworkshop evaluiert. Dabei wurde die prinzipielle Eignung von 3D-MECHGRAPH zur Förderung des

interdisziplinären Systemverständnis und zur Förderung der interdisziplinären Kommunikation bei der Entwicklung mechatronischer Systeme bestätigt. Vielversprechende Konzepte zur Optimierung von 3D-MECHGRAPH wurden in den Kapiteln 8.4.2 bis 8.4.5 vorgestellt und sollten in einer Folgearbeit umgesetzt werden. Weitere Anwendungspotentiale von 3D-MECHGRAPH finden sich im Anhang.

9 Weiterführende Konzepte zur funktionsorientierten Integration

In Kapitel 7 wurde das Vorgehen zur Erstellung eines integrierten Produktmodells für mechatronische Systeme des Automobils beschrieben. Dieses bildet die Zuordnung von Systemelementen zu Funktionen sowie zugehörige Funktions- und Systemelementverantwortlichkeiten ab. Um eine transparente Darstellung dieser interdisziplinären Vernetzungsinhalte zu ermöglichen und um durch einen interaktiven Nachvollzug von System- und Verantwortungsstrukturen das interdisziplinäre Systemverständnis zu verbessern, wurde anschließend in Kapitel 8 ein dreidimensionaler Visualisierungsansatz auf Basis stärkebasierter Graphen vorgestellt.

Durch die Verknüpfung des integrierten Produktmodells mit einem Spezifizierungsschema für funktionsbezogene Absicherungsaktivitäten soll im Folgenden klarer dargestellt werden, welche interdisziplinären Kommunikationsprozesse vor und nach funktionsbezogenen Absicherungsaktivitäten notwendig sind. Motiviert ist dies somit durch die in Kapitel 5.2 genannten Probleme der reibungslosen Zusammenführung von disziplinspezifischen Entwicklungsaktivitäten in Bezug auf Absicherungsaktivitäten. Der Ansatz soll daher zum einen die Beantwortung der Frage ermöglichen, welche Entwicklungsumfänge für die Durchführung welcher Versuche zur Funktionsabsicherung benötigt werden und hierdurch zum anderen aufzeigen, welche interdisziplinären Kommunikationsteams gebildet werden sollten.

Hierzu integriert der Ansatz die Struktur des Systems ausgehend von der zu realisierenden Kundenfunktion sowie die zugehörigen Verantwortlichkeiten und bildet diese zusammen mit den funktionsorientierten Absicherungsaktivitäten in einem Integrationsmodell ab. Das Spezifizierungsschema für Absicherungsaktivitäten dient dabei der Aufnahme der bestehenden Versuchslandschaft und der Reflektion, welche Funktionen in welchen Absicherungsaktivitäten überprüft werden können.

Der Ansatz konzentriert sich somit auf die stufenweise Entwicklung von Funktionen. Die für den Entwicklungsprozess ebenfalls sehr wichtige Eigenschaftssicht wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. Mit der Ermittlung von eigenschaftsbezogenen Kommunikationsteams beschäftigen sich jedoch intensiv HERFELD [2007] und KLEEDÖRFER [1999].

9.1 Funktionale Integrationsstufen

Die grundsätzliche Logik der schrittweisen Realisierung und Absicherung von Kundenfunktionen im Serienentwicklungsprozess ist in Abbildung 9-1 dargestellt. Zunächst müssen die Elementarfunktionen eine ausreichende Reife erzielen, bevor durch deren Kombination Teilfunktionen getestet und abgesichert werden können. Wird die ermittelte Reife auf der jeweiligen funktionsbezogenen Integrationsstufe als nicht ausreichend bewertet, müssen Optimierungen an den funktionsrealisierenden Systemelementen vorgenommen

werden. Die notwendigen Einzeloptimierungen werden zwar durch eine spezifische Disziplin hauptverantwortet, müssen jedoch insbesondere mit fortschreitendem Serienentwicklungsprozess interdisziplinär abgestimmt werden. Dies liegt an der Zunahme des mechatronischen Grades der funktionalen Integrationsstufen. Entsprechend dieser Logik nimmt die Anzahl der Versuchsstände ausgehend von vielen domänenspezifischen Einzelprüfständen auf Bauteil- und Teilsystemebene hin zu domänenübergreifenden Gesamtfahrzeugtests ab. Die dargestellte Integrationslogik in Bezug auf die Versuche muss nicht immer Schritt für Schritt durchlaufen werden. Teilweise können niedrigere Integrationsstufen durch Versuche auf höherer Ebene mit abgesichert werden. Diese Abwägung der benötigten Absicherungsstufen ist Aufgabe der Absicherungsplanung im engeren Sinne, die jedoch in diesem Rahmen nicht behandelt wird. Es wird von einer bestehenden Absicherungsplanung ausgegangen. Die prinzipiell sinnvollen funktionalen Integrationsstufen lassen sich jedoch aus einer Funktionshierarchie, wie sie in Kapitel 7.3 erstellt wurde, ableiten.

Da häufig eine erhebliche Intransparenz der Absicherungslandschaft besteht, ist es schwer zu identifizieren, welche Funktionsumfänge in welchen Versuchen abgeprüft werden beziehungsweise abgeprüft werden können. Daher wird im folgenden Kapitel ein Spezifizierungsschema zur Aufnahme der Absicherungslandschaft vorgeschlagen. Anschließend wird beschrieben, wie die Verknüpfung von Funktionen und Absicherungsaktivitäten⁹ vorgenommen werden kann.

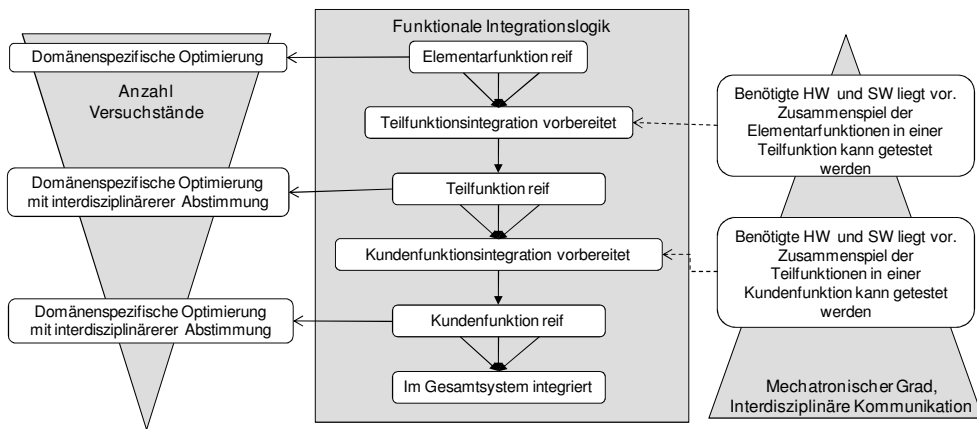


Abbildung 9-1: Funktionale Integrationslogik

⁹ Der Begriff Absicherungsaktivität wird synonym mit dem Begriff Versuch verwendet und umfasst sowohl virtuelle als auch reale Versuche.

9.2 Vernetzung des integrierten Produktmodells mit funktionsbezogenen Absicherungsaktivitäten

9.2.1 Spezifizierung funktionsbezogener Absicherungsaktivitäten

Um eine Zuordnung von Funktionen zu Absicherungsaktivitäten durchführen zu können, ist eine Analyse der Absicherungslandschaft notwendig. Jeder Versuchstand muss genauer spezifiziert werden, um abwägen zu können, ob ein bestimmter Funktionsumfang mit diesem überprüft werden kann.

In Kapitel 7.4 wurde aufgezeigt, dass Funktionen in Bezug auf die Baustruktur verteilt oder gekapselt in einer Baugruppe realisiert sein können. Daher ist für die Durchführung eines Versuchs zur Überprüfung einer Funktion die Integration einer spezifisch durch diese Funktion bestimmte funktionsrealisierende Teilmenge der Baustruktur notwendig. In Abhängigkeit des Integrationsumfangs lassen sich somit vorab grobe Versuchsklassen unterscheiden (siehe Kapitel 4.3.3):

- Gesamtfahrzeugtest,
- Teilsystemtest
- Test auf Bauteilebene (oder Werkstoffebene)

Die einzelnen Systemelemente des Integrationsumfangs müssen je nach Versuchstyp den Versuchsverantwortlichen in unterschiedlicher Form vorliegen, um den Versuch vorbereiten und durchführen zu können. Beispiele für Versuchstypen sind nach [BRAESS & SEIFFERT S.766] (vgl. Kapitel 4.3.3):

- Reale Straßenfahrt,
- Mess- und Prüfgelände,
- Physikalische Prüfstände,
- „Dummies in the Loop“,
- „Hardware in the Loop“,
- „Man in the Loop“,
- „Virtuelle Prüfstände“

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Form, in der die einzelnen Elemente für den jeweiligen Versuchstyp vorliegen müssen, als Aggregatzustand bezeichnet. Der Aggregatzustand kann sich zwar durch die Aktivitäten des Versuchsverantwortlichen noch ändern, jedoch soll folgend nur der Zustand betrachtet werden, den der Versuchsverantwortliche als Eingangsgröße benötigt. Aggregatzustände können beispielweise sein (vgl. [BRAESS & SEIFFERT 2005, S.766FF]):

- Spezifische Dokumente,

- CAD-Modell,
- FEM-Modell,
- Simulation / simuliert,
- Rapid Prototyping-Teil,
- physisches Teil mit seriennahen Werkzeugen gefertigt

Neben den bereits aufgeführten Elementen sollte das zentrale Absicherungsziel der Absicherungsaktivität in freier Textform aufgenommen werden. Die freie Beschreibung sollte das Versuchsobjekt sowie das übergeordnete Absicherungsziel beinhalten. Beispiele hierfür sind:

- Funktionsüberprüfung Schiebehebedach unter extremen Umweltbedingungen
- Werkstoffverhalten Schiebehebedachkomponenten unter definierten Betriebsbedingungen
- Virtuelle Montage-/Demontageuntersuchung Schiebehebedach für Service

Eine genauere Spezifizierung, der in einem Versuchsstand abzutestenden Teilmenge der Baustruktur, ist anschließend notwendig, um den genauen Integrationsumfang zu definieren und darauf basierend überprüfbare Funktionen identifizieren zu können. Hierzu sollte die Baustruktur in softwaregestützter Form beispielweise durch Kopplung mit einem PDM-System direkt herangezogen werden. In der Baustruktur müssen dann die betroffenen Baugruppen beziehungsweise Systemelemente selektiert und der jeweils benötigte Aggregatzustand zugeordnet werden.

Abbildung 9-2 zeigt einen noch zu evaluierenden Vorschlag für die Aufnahme der angesprochenen Spezifizierungsaspekte ergänzt um die organisatorischen Punkte:

- Ansprechpartner Versuchsdurchführung
- Versuchsort
- Zeitliche Einordnung
 - Versuchsstart
 - Versuchsdauer
 - Versuchsende

Versuchsklasse

- Teilsystemtest
- Gesamtfahrzeugtest
- Teilsystemtest
- Bauteiltest

Versuchstyp

- Reale Straßenfahrräder
- Mess- und Prüfstände
- Physikalische Prüfstände
- Dummies in the loop
- Hardware in the loop
- Man in the loop
- Virtuelle Prüfstände
- ...

Kurzbeschreibung des Absicherungsziels:

Funktionsüberprüfung Baugruppe Schiebebedach unter extremen Umweltbedingungen

Ansprechpartner Versuch Jörg Müller

Versuchsort LS-2456, Mannheim

Versuchsphase V-2

Datum Start 1.1.2007

Datum Ende 1.2.2007

Definition des physischen Integrationsumfangs in der Baustruktur

A	B	C	D
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Baugruppe C1	Systemelement B1.C1.D1
		Definiert durch Unterbaugruppe	RP-Teil
			Systemelement B1.C1.D2
			RP-Teil
			Systemelement B1.C1.D3
			RP-Teil
			Systemelement B1.C1.D3
			Simuliert

Abbildung 9-2: Formblatt zur Spezifizierung von Absicherungsaktivitäten

Die Aufnahme der Versuchsattribute kann mit Hilfe des Formblattes erfolgen und in einer Datenbank abgelegt werden. Neben den aufgeführten Attributen können im operativen Alltag weitere von Interesse sein. Die Auflistung stellt somit eine exemplarische Sammlung der für diese Arbeit wichtigsten Elemente dar. Da häufig keine Transparenz der Versuchslandschaft besteht und somit häufig nicht bekannt ist, welche disziplinspezifischen Entwicklungsinhalte für welche Integrationsaktivitäten wann benötigt werden, stellt die Analyse der Versuchslandschaft eine wichtige Basisvoraussetzung zur Steigerung der interdisziplinären Entwicklungseffektivität dar. Das beschriebene Vorgehen kann und soll keine Absicherungsplanung im eigentlichen Sinne ersetzen, bietet jedoch im Zusammenspiel mit der folgend beschriebenen Zuordnung von Funktionen die Möglichkeit diese zu reflektieren.

9.2.2 Verknüpfung von Funktionen und Absicherungsaktivitäten

Durch die Verwendung des integrierten Produktmodells, in dem sich die Zuordnung von Funktionen zu Systemelementen findet, lassen sich, nachdem der Integrationsumfang einer Absicherungsaktivität bestimmt ist, die zugehörigen Elementarfunktionen ableiten. Hierzu wird die MDM des integrierten Produktmodells erweitert. Durch die Gegenüberstellung der Domäne Versuch zu Systemelement können die im Formblatt aufgenommenen Integrationsumfänge in eine Matrixform übertragen werden. Die jeweilig benötigten Aggregatzustände können durch eine Zahlencodierung festgehalten werden.

Die im Folgenden gezeigten Ausschnitte der MDM verdeutlichen die einzelnen Kombinationsschritte zur Ableitung von Vernetzungsinformationen zwischen Funktionen und Absicherungsaktivitäten. Der Übersichtlichkeit halber sind jeweils nur die im entsprechenden Schritt notwendigen Betrachtungsdomänen dargestellt.

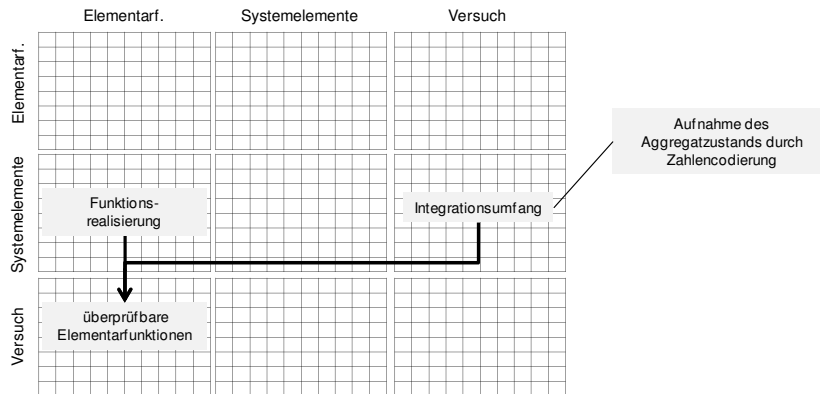


Abbildung 9-3: Ableitung überprüfbarer Elementarfunktionen

Welche Teilfunktionen und Kundenfunktionen mit dem Versuch überprüft werden können, muss durch Analyse der Funktionshierarchie ermittelt werden. Die Funktionshierarchie definiert aus welchen Elementarfunktionen die Teilfunktionen und Kundenfunktionen bestehen. Da gekapselte und verteilte Funktionen unterschieden werden (siehe Kapitel 7.4), muss eine abgeprüfte Baugruppe nicht einer Teil- oder Kundenfunktion entsprechen.

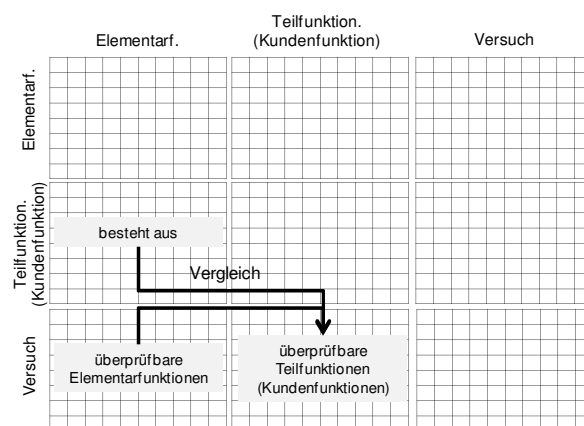


Abbildung 9-4: Identifikation überprüfbarer Teil- und Kundenfunktionen

Wie in Kapitel 7.3 aufgezeigt, werden für einige Systemelemente Hilfsfunktionen benötigt, die die Anbindung zusätzlicher Systemelemente erforderlich machen. Im Rahmen der Verknüpfung von Funktionen und Absicherungsaktivitäten wird daher überprüft, welche

Hilfsfunktionen die einzelnen Systemelemente des Integrationsumfangs benötigen (Abbildung 9-5 links). Hierzu kann auf die bereits erfolgte Zuordnung von Hilfsfunktionen zu Systemelementen zurückgegriffen werden. Anschließend müssen die für die Erfüllung der identifizierten Hilfsfunktionen notwendigen Systemelemente (Hilfselemente) festgehalten werden (Abbildung 9-5 rechts). Durch die Gegenüberstellung der Domänen Versuche und Hilfselemente können darüber hinaus zusätzlich benötigte Einzelteile, wie Kabel oder Stecker festgehalten werden.

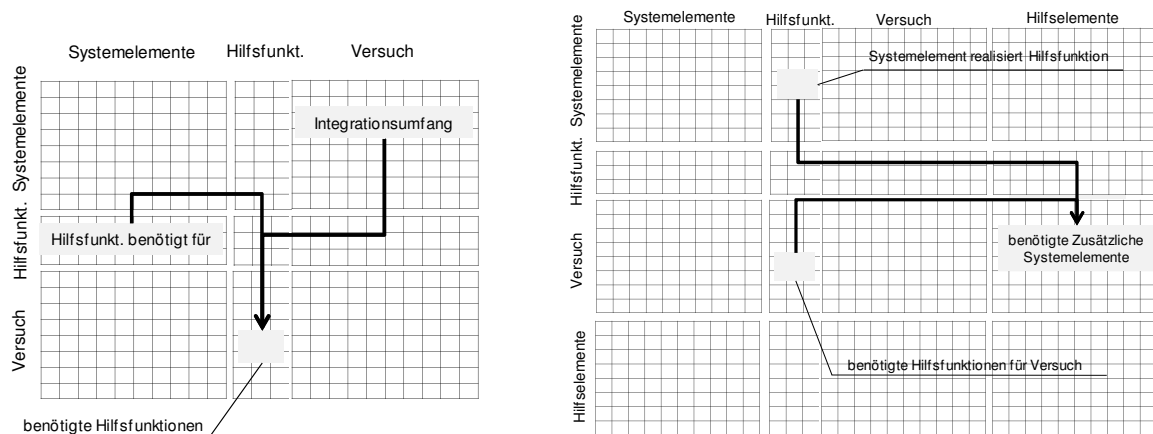


Abbildung 9-5: Identifikation notwendiger Hilfsfunktionen und Hilfselemente

Durch das geschilderte Vorgehen wird festgehalten, welche Absicherungsaktivitäten welche Funktionen abprüfen und welche Systemelemente und Baugruppen hierfür in welchem Aggregatzustand vorliegen müssen. Dies kann im Rahmen des Risikomanagements und der Qualitätssicherung verwendet werden, um zu überprüfen, ob eine bestehende Absicherungsplanung alle Funktionen in ausreichender Form absichert. Je nach Neuigkeitsgrad, Schwierigkeiten der Vergangenheit, Sicherheitskritikalität oder Gewährleistungsfällen im Feld müssen die Funktionen intensiver oder weniger intensiv abgesichert werden (vgl. [LÉVÁRDY ET AL 2004]). Durch diesen Vergleich können somit notwendige Zusatzversuche abgeleitet aber auch überflüssige Mehrfachversuche identifiziert werden. Eine intensive Analyse bestehender Absicherungsplanungen ist insbesondere dann erforderlich, wenn sich im Vergleich zu Vorgängerprodukten die Produktarchitektur gravierend ändert. Zusätzliche Absicherungsaktivitäten können im laufenden Serienentwicklungsprozess trotz einer bereits erfolgten Planung notwendig werden, wenn aktuelle Versuchsergebnisse auf massive Probleme hindeuten (siehe Kapitel 9.2.3). Hierzu ist jedoch eine intensive Reflektion der Absicherungsergebnisse mit den Entwicklungsbeteiligten notwendig. Wer hierzu miteinander kommunizieren sollte, wird im folgenden Kapitel ermittelt.

9.2.3 Ableitung von Kommunikationsteams

Abbildung 9-6 stellt abstrahiert die interdisziplinären Prozesse vor und nach einer Absicherungsaktivität dar. Die einzelnen Teilentwicklungen der Disziplinen müssen mit einem gewissen Vorlauf zur Absicherungsaktivität eingefroren beziehungsweise freigegeben werden, um die für den Versuch benötigten Komponenten fertigen und den Versuch vorbereiten zu können. Sind die notwendigen Integrationsumfänge bekannt, so können die notwendigen Integrationsprozesse und die für die Teilentwicklungen verantwortlichen Personen ermittelt werden. Die Integrationsprozesse lassen sich durch Erfahrungswissen in Kombination mit der erarbeiteten Beschreibung der benötigten Integrationsumfänge ableiten. Dies beinhaltet die Rückwärtsplanung von Freigabezeitpunkten für die Fertigung von Systemelementen und die Versuchsvorbereitung.

Von zentraler Wichtigkeit ist, dass die einzelnen Entwicklungsverantwortlichen zusammen mit den Versuchsvorbereitern und Versuchsdurchführenden Personen zu einem Integrationsteam vereinigt werden. Verantwortliche und Bearbeiter der jeweiligen Systemelemente und Funktionen wurden bereits im integrierten Produktmodell festgehalten und lassen sich somit daraus ableiten. Das Integrationsteam kann entweder vom Versuchsverantwortlichen oder einem Entwicklungsverantwortlichen koordiniert und moderiert werden. Ziel der Bildung des Integrationsteams soll es sein, die Zusammenführung der einzelnen Entwicklungsergebnisse reibungslos zu gestalten. Hierzu müssen im Integrationsteam kritische Integrationsaspekte wie beispielsweise unreife Teilentwicklungen oder eine unzureichende Verfügbarkeit von Versuchsträgern vor und während dem Integrationsprozess diskutiert und Problemlösungen entwickelt werden. Unklare Punkte des interdisziplinären Zusammenspiels der Komponenten im Versuch sowie die Ziele des Versuchsprozesses sollten im Integrationsteam besprochen werden, um das interdisziplinäre System- und Problemverständnis zu verbessern.

Durch die Bildung eines Integrationsteams können darüber hinaus direkter Zwischenergebnisse des Versuchsprozesses ausgetauscht und diskutiert werden. Hierdurch kann bereits in den parallel laufenden Entwicklungsprozessen entsprechend auf die Erkenntnisse reagiert werden. Dies führt zu erheblichen Zeiteinsparungen, da nicht erst zum Abschluss der Absicherungsaktivitäten alle Erkenntnisse auf einmal verarbeitet werden müssen. Die Notwendigkeit die Kommunikationswege zwischen integrierenden Bereichen wie beispielsweise den versuchsdurchführenden Abteilungen und den Entwicklern zu verbessern zeigen SOSA ET AL. [2007] am Bau des Airbus A380 auf. SOSA ET AL. betonen, dass durch die Verbesserung der Kommunikation insbesondere Probleme mit bekannten und unbekanntem Schnittstellen zwischen Komponenten besser erkannt werden können.

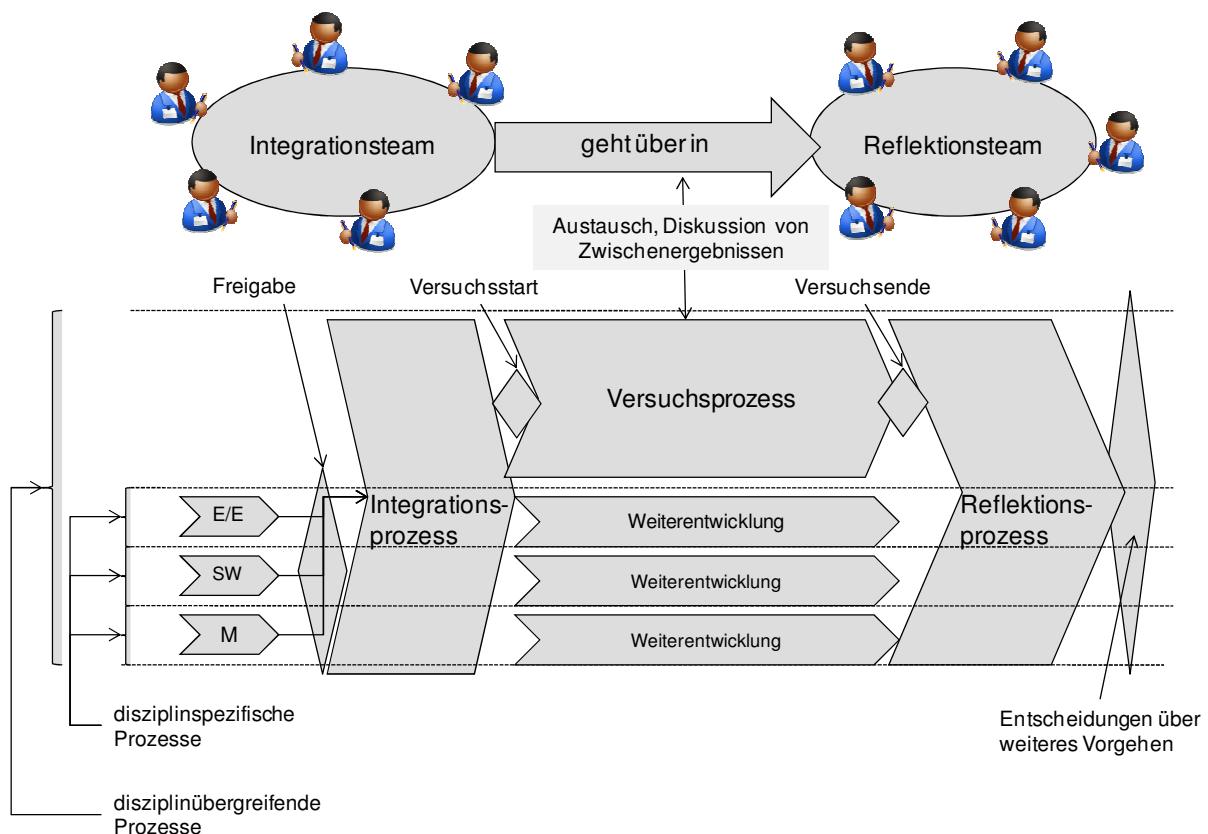


Abbildung 9-6: Grundprinzip des interdisziplinären Zusammenspiels vor und nach Versuchen

Das eingeführte Integrationsteam wandelt sich im Laufe des Versuchsprozesses zum Reflektionsteam, das im Anschluss gemeinsam die Ergebnisse und Erkenntnisse des Versuchs reflektiert. Durch die Bildung des Reflektionsteams wird eine direktere Kommunikation sichergestellt und zu stark formalisierte und somit häufig zu lange Kommunikationswege vermieden. Durch die interdisziplinäre Diskussion im Team wird wiederum das interdisziplinäre System- und Problemverständnis gefördert. Da der Entwicklungsprozess meist parallel zum Absicherungsprozess weiterläuft, müssen die Ergebnisse des Versuchs in Bezug auf den neuen Entwicklungsstand diskutiert werden. Zu klären ist, wie kritisch die durch den Versuch identifizierten Probleme sind, ob diese eventuell durch die erfolgte Weiterentwicklung bereits behoben worden sind oder ob die Zielerreichung in der verbleibenden Entwicklungszeit gefährdet ist. Gegebenenfalls müssen entsprechende Maßnahmen in Form von Taskforces oder die Planung zusätzlicher Entwicklungs- und Absicherungsaktivitäten beschlossen werden.

In welcher Form das Integrationsteam und das Reflektionsteam gebildet werden, hängt von individuellen Randparametern wie beispielsweise der räumlichen Verteilung der Entwicklungsverantwortlichen sowie vom Integrationsumfang und der Kritikalität der abzusichernden Funktionen ab.

Die Logik der Ableitung der Kommunikationsteams aus den bereits in den Kapiteln 7 und 9.2.2 hergeleiteten Abhängigkeitsinformationen stellt Abbildung 9-7 dar. Aufbauend auf den im Integrierten Produktmodell bereits definierten Funktions- und Systemelement-

verantwortlichen lassen sich in Kombination mit den Integrationsumfängen und der Menge abprüfbarer Funktionen die entsprechenden Integrations- und Reflektionsteams ableiten. Zusätzlich erweitert wird das Team durch die Versuchsverantwortlichen.

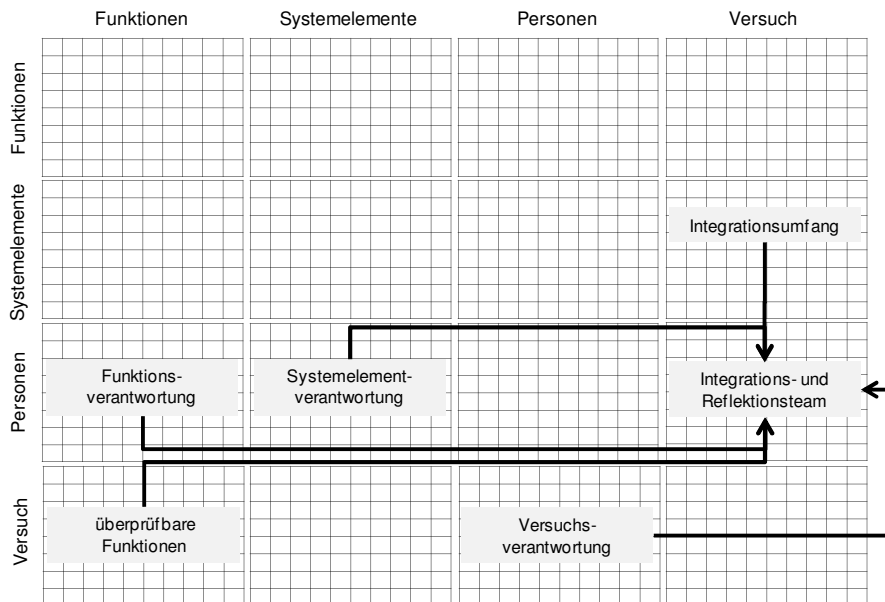


Abbildung 9-7: Matrixbasierte Ableitung von Kommunikationsteams

9.3 Reflektion und Vernetzungspunkte zu weiteren Themenbereichen

In den vorweggegangenen Kapiteln wurde ein methodisches Vorgehen zur Vernetzung von Absicherungsaktivitäten und zu entwickelnden Funktionen aufgezeigt. Durch die Aufnahme der Absicherungslandschaft mit Hilfe eines Spezifizierungsschemas können die jeweils benötigten Integrationsumfänge der Baustruktur festgehalten werden. Die anschließende Ableitung der damit überprüfbaren Funktionen ermöglicht es, durch Nutzung der im integrierten Produktmodell bereits enthaltenen Verantwortlichkeiten, notwendige Kommunikationsteams zu identifizieren. Das geschilderte Vorgehen erhöht die Transparenz der interdisziplinären Serienentwicklung von Funktionen und hilft somit insbesondere folgende Fragen zu klären:

- Welche geplanten Versuche sichern welche Funktionen ab?
- Welche Integrationsumfänge werden hierfür benötigt?
- Wer muss daher im Vorfeld, während und nach dem Versuch miteinander kommunizieren?

Dabei konzentriert sich das geschilderte Vorgehen auf die Funktion als verbindendes Element der interdisziplinären Entwicklung. Für die Vernetzung von Eigenschaften und Konstruktionsverantwortlichen schlägt KLEEDÖRFER Matrixteams vor. Für jedes Eigenschaftsfeld wird ein Matrixteam, bestehend aus den Verantwortlichen der eigenschaftsorientierten Versuche sowie den Konstruktionsverantwortlichen der Komponenten, die einen Einfluss auf das entsprechende Eigenschaftsfeld haben, definiert [KLEEDÖRFER 1999, S. 96F]. Hierdurch soll dem Umstand Rechnung getragen werden, dass keine eindeutigen Verantwortlichkeiten für die Eigenschaftsfelder definierbar sind, da die Eigenschaften durch das Zusammenwirken mehrerer Komponenten bestimmt sind. HERFELD intensiviert diese Betrachtung und stellt systematisch Komponenten und Eigenschaften in einer Matrix gegenüber. Komponenten und Eigenschaften werden wiederum mit Verantwortlichkeiten verknüpft, um anschließend Kommunikationsteams aus Konstruktions- und Simulationsverantwortlichen abzuleiten und somit den Informationsaustausch zwischen diesen beiden Bereichen zu verbessern [HERFELD 2007].

Durch eine Kombination des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten funktionsorientierten Ansatzes zur interdisziplinären Kommunikationsverbesserung mit den durch HERFELD und KLEEDÖRFER entwickelten eigenschaftsorientierten Ansätzen, lassen sich nach Ansicht des Autors Prozessmodellierungstechniken entwickeln, die stärker an funktionsüberprüfenden und eigenschaftsermittelnden Meilensteinen orientiert sind, als an der Bauteilentwicklung (vgl. [HERFELD 2007, S.46]). Hierdurch kann eine weitere Verbesserung der Transparenz in Bezug auf die interdisziplinäre Entwicklungsprozesse mechatronischer Systeme generiert werden.

Für die Planung der einzelnen Entwicklungsaktivitäten zwischen den Absicherungsaktivitäten sollten verstärkt flexible Prozessplanungsmethoden eingesetzt werden. Eine starre Vorausplanung ist auf Grund der oft schwer vorhersagbaren Ergebnisse der Absicherungsaktivitäten und der damit verbundenen Iterationsbedarfe nicht sinnvoll. Auf unvorhergesehene Ereignisse kann somit bei Anwendung starrer Planungsmethoden nicht angemessen reagiert werden. Die durch BICHLMAIER entwickelte Methode zu Planung von Entwicklungsprozessen mit Hilfe von Prozessbausteinen stellt eine sinnvolle Alternative dar, die eine erheblich größere Flexibilität erlaubt [BICHLMAIER 2000].

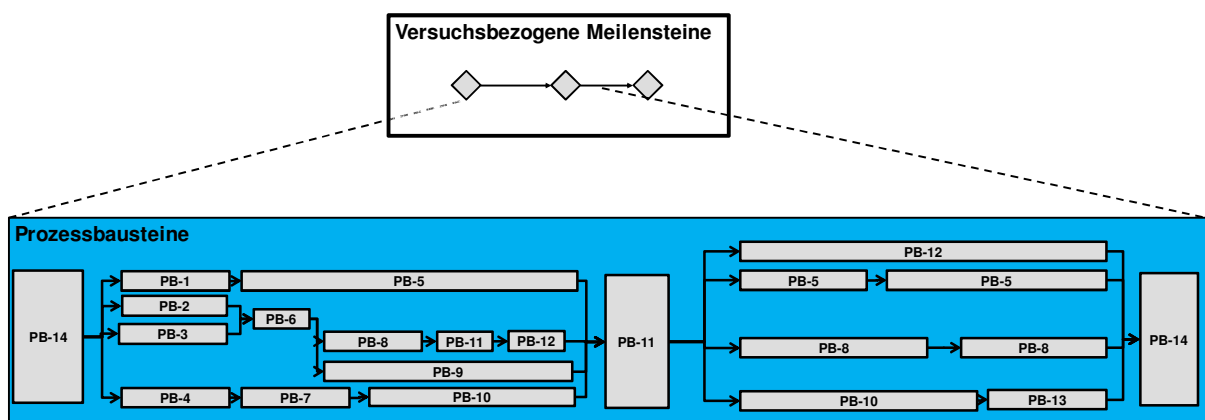


Abbildung 9-8: Detaillierung des Prozesses durch Prozessbausteine

Grundvoraussetzung für den Einsatz von Prozessbausteinen ist die Erstellung eines Prozessbaukastens. Hierfür müssen die typischen Entwicklungsaktivitäten der einzelnen

Disziplinen aufgenommen und in einer Datenbank abgelegt werden. Prozessketten können dann durch Verknüpfung der Prozessbausteine über ihre Ein- und Ausgangsattribute erstellt werden. BAUMBERGER schlägt im Rahmen der Planung von Adaptionprozessen für die kundenindividuelle Ausgestaltung von Produkten eine Unterteilung in Basisaktivitäten und indirekten Aktivitäten vor [BAUMBERGER 2007, S.191 ff]. Basisaktivitäten dienen dem direkten Erkenntnisgewinn und werden durch BAUMBERGER unterteilt in:

- Analysieren
- Konzipieren
- Gestalten
- Ändern (Sonderfall von Gestalten)
- Auslegen
- **Integrieren (Gesamtprodukt)**
- **Absichern**
- **interdisziplinäre Reflektion** (für diese Arbeit ergänzt)
- Optimieren: enthält nach BAUMBERGER: Änderung, Absicherung und Integrationsaktivitäten. Alternativ auch als Rückschleife darstellbar.

Für die detaillierte Planung der Entwicklung mechatronischer Produkte können die Basisaktivitäten nach BAUMBERGER als Orientierungshilfe genutzt werden, müssen jedoch disziplinspezifisch ausformuliert werden. Die fett markierten Punkte in obiger Liste stellen im Rahmen dieser Arbeit die zentralen Orientierungspunkte im Prozess dar und wurden im vorherigen Kapitel detaillierter diskutiert. Ergänzt werden muss als weiterer wichtiger Punkt die Basisaktivität **interdisziplinäre Reflektion**, die sich wie beschrieben an die Absicherungsaktivitäten anschließen sollte. Die interdisziplinäre Reflektion dient als Basis für die Planung notwendiger Prozessadaptionen auf Grund erforderlicher Optimierungsaktivitäten oder Änderungsaktivitäten.

Neben den direkten Entwicklungsaktivitäten führt Baumberger indirekte Aktivitäten auf. Diese stellen übergreifende organisatorische Sachverhalte dar und müssen die Prozessplanung gegebenenfalls ergänzen. Sie lauten im Einzelnen:

- Informationen beschaffen
- Dokumentieren (z.B. Zeichnungserstellung dient nicht dem direkten Lösungsfortschritt)
- Koordinieren
- Freigeben
- Planen

Weitere Anknüpfungspunkte des geschilderten Ansatzes ergeben sich zum Variantenmanagement. Durch die große Anzahl kundenbestimbarer Ausstattungsvarianten

sowie länderspezifischer Varianten muss geprüft werden, ob für die einzelnen Varianten separate Absicherungsaktivitäten notwendig sind, beziehungsweise, wie in optimaler Weise ein möglichst große Abdeckung durch die Absicherungsplanung erzielt werden kann.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das folgende Kapitel fasst die zentralen Inhalte der vorliegenden Arbeit zusammen. Zusätzlich wird ein Ausblick auf sinnvolle Weiterentwicklungen der erarbeiteten Ansätze aufgezeigt.

10.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In den vergangenen Jahren hat sich das Automobil von einem rein mechanischen System mit verbrennungsmotorischem Antrieb hin zu einem mechatronischen System mit hybriden Antriebskonzepten gewandelt. Das Zusammenwirken unterschiedlichster mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Komponenten bedingt eine erhöhte Komplexität des Produktes. Zusätzlich ist für die Entwicklung der mechatronischen Systeme ein enges Zusammenwirken der Disziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik notwendig. Hierdurch ist eine erhebliche Zunahme der Prozesskomplexität zu beobachten.

Automobilhersteller stehen auf Grund der gestiegenen Produkt- und Prozesskomplexität vor enormen Herausforderungen. Dies ist im Gesamtkontext des anhaltenden Trends zum Kundenmarkt sowie des verschärften Wettbewerbs und den hierdurch notwendigen kürzeren Entwicklungszeiten sowie der Spreizung des Produktprogramms zu sehen. Insbesondere hohe Gewährleistungs- und Absicherungskosten deuten darauf hin, dass die notwendige Integration der Teildisziplinen der Mechatronik noch nicht weit genug fortgeschritten ist.

Am Beispiel Schiebehebedach und Comfort Access wurden im Rahmen dieser Arbeit zentrale Herausforderungen der Serienentwicklung mechatronisch geprägter Fahrzeugsysteme beleuchtet. Dabei wurde aufgezeigt, dass der einzelne Entwickler auf der Mikroebene des operativen Alltags bisher zu wenig bei der Beherrschung der erhöhten Produkt-Prozesskomplexität unterstützt wird. Das dringend erforderliche interdisziplinäre System- und Problemverständnis wird durch intransparente Verantwortungsstrukturen, disziplinspezifische Prozessmodelle und eine höchst komplexe Toollandschaft zu Nichte gemacht. Häufig äußern sich diese Unzulänglichkeiten in Problemen bei der Durchführung von Absicherungsaktivitäten. So ist häufig nicht unmittelbar bekannt, welche disziplinspezifischen Entwicklungsaktivitäten für eine spezifische Absicherungsaktivität fristgerecht zusammengeführt werden müssen und welches die zugehörigen Ansprechpartner sind. Zudem werden, auf Grund des mangelnden interdisziplinären Systemverständnisses und der mangelnden interdisziplinären Kommunikation, Unzulänglichkeiten des Zusammenwirkens der disziplinspezifischen Komponenten häufig erst in späten und somit kostenintensiven Phasen aufgedeckt.

Lösungsansätze:

Die vorliegende Arbeit liefert in Form des Visualisierungstools 3D-MECHGRAPH eine Methode zur transparenten Darstellung disziplin- und domänenübergreifender

Abhängigkeiten. Hierdurch wird ein elementarer Beitrag zur Förderung des interdisziplinären System- und Problemverständnisses und somit zur besseren Integration der Teildisziplinen geliefert. Betrachtungsdomänen wie Funktionen, Systemelemente und Personen werden in 3D-MECHGRAPH jeweils durch eine im dreidimensionalen Raum schwebende Ebene repräsentiert. Innerhalb einer Ebene werden domäneninterne Abhängigkeiten zwischen Elementen in Form von stärkebasierten Graphen repräsentiert. So können beispielsweise in Bezug auf die Domäne „Systemelemente“ Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten des mechatronischen Systems visualisiert und nachvollzogen werden. Domänenübergreifende Beziehungen wie die Funktionsrealisierung (Systemelement-Funktion) oder die Systemelementverantwortlichkeit (Person-Systemelement) werden durch ebenenvernetzende Vektoren visualisiert. Unterstützt durch eine Funktion zur interaktiven Navigation durch die visualisierten Strukturen können durch 3D-MECHGRAPH somit insbesondere folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Systemelemente des mechatronischen Systems weisen Schnittstellen zu einander auf?
- Wer trägt die Verantwortung für die jeweiligen Systemelemente?
- Wer muss daher bei Änderungen miteinander kommunizieren?
- Welche Funktionen realisiert ein Systemelement?
- Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen Funktionen?
- Welche funktionalen Abhängigkeiten weisen somit die Systemelemente auf?
- Wer trägt die Verantwortung für die Funktionen?

Wie die in 3D-MECHGRAPH zu visualisierenden Abhängigkeiten methodisch erarbeitet werden können, wurde am Beispiel der Entwicklung eines innovativen Türöffnungskonzeptes aufgezeigt. Eingesetzte Systemmodellierungsmethoden waren das relationsorientierte Funktionsmodell, die Funktionshierarchie und die Wirkstrukturmodellierungsmethode nach GEHRKE [2005]. Die aufgenommenen Abhängigkeiten der Betrachtungsdomänen Funktionen, Systemelemente und Personen wurden anschließend durch den Einsatz einer Multidomänenmatrix nach MAURER [2007] zu einem integrierten Produktmodell zusammengefasst, vereinheitlicht und für die Visualisierung vorbereitet.

Aufbauend auf den im integrierten Produktmodell festgehaltenen Abhängigkeiten, beschäftigten sich weiterführende Gedanken der Arbeit mit der effizienteren Zusammenführung der Teildisziplinen der Mechatronik in Bezug auf funktionsorientierte Absicherungsaktivitäten. Der Ansatz basiert auf der matrixgestützten Verknüpfung der zuvor erarbeiteten Funktions- und Systemelementverantwortlichkeiten mit Absicherungsaktivitäten. Ziel dieses Ansatzes ist es, durch die Bildung von interdisziplinären Integrations- und Reflektionsteams vor beziehungsweise nach Aktivitäten zur Absicherung von Funktionen das gemeinsame System- und Problemverständnis zu fördern. In diesem Kontext wurde zusätzlich aufgezeigt, wie durch den Einsatz von Multidomänenmatrizen notwendige Integrationsumfänge für die Absicherung von Funktionen des mechatronischen Systems abgeleitet werden können. Hierzu wurde die Serienentwicklung als schrittweise Realisierung und

Überprüfung von Kundenfunktionen aufgefasst. Die Entwicklung von Eigenschaften wie Akustik oder Crash wurde in diesem Kontext nicht betrachtet. Jedoch ergibt sich durch die Verknüpfung der aufgezeigten funktionsorientierten Betrachtung mit Ansätzen der eigenschaftsorientierten Betrachtung [HERFELD 2007] [KLEEDÖRFER 1999] ein erhebliches Potential den Serienentwicklungsprozess mechatronischer Fahrzeugsysteme effizienter zu gestalten.

10.2 Ausblick

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Tool 3D-MECHGRAPH zur Visualisierung zentraler Abhängigkeiten und Vernetzungen im mechatronischen Kontext bietet durch seine leichte Anpassbarkeit das Potential zur Anwendung in weiteren Forschungsbereichen. Hierzu zählen die Prozessplanung, die Entwicklung modularer Strukturen oder das Variantenmanagement. Allgemein kommt als Anwendungsbereich von 3D-MECHGRAPH die Analyse komplexer Zusammenhänge aus verschiedenen Perspektiven in Betracht.

Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten zusätzlich die entwickelte Visualisierungstechnik von 3D-MECHGRAPH aufgreifen und die in Kapitel 8.4.3 diskutierten domänenübergreifenden Ausrichtungsmechanismen umsetzen und deren Potentiale genauer analysieren. Hierdurch verspricht sich der Autor eine weitere Verbesserung bei der Analyse domänenübergreifender Strukturmerkmale.

Zur optimierten Integration von 3D-MECHGRAPH in die bestehende Toollandschaft erscheint eine intensivere Anbindung an bestehende Softwaresysteme insbesondere aus dem CAX-Bereich sinnvoll. Hierdurch können direkter die bereits in den Softwaresystemen implizit abgebildeten Abhängigkeitsstrukturen transparent visualisiert werden. Beispielsweise können geometrische Schnittstellen direkt aus Kollisionsanalysen von CAD-Systemen wie CATIA V5 abgeleitet und in 3D-MECHGRAPH visualisiert werden (siehe Abbildung 10-1). Hierdurch ergeben sich weitere Anwendungspotentiale wie zum Beispiel die Umsetzung von Baukasten und Plattformstrategien¹⁰. Werden in 3D-MECHGRAPH die Vernetzungen von Systemelementen mit anderen Systemelementen aus funktionaler, energetischer, informationstechnischer und geometrischer Sicht dargestellt, so lassen sich Bereiche (Cluster) identifizieren die auf Grund weniger Schnittstellen zum restlichen System geeigneter sind für die Festlegung eines Baukastensystems als Bereiche die viele Wechselwirkungen zu ihrer Systemumgebung aufweisen.

¹⁰ Vergleiche die Definition modularer Strukturen nach GÖPFERT 1998.

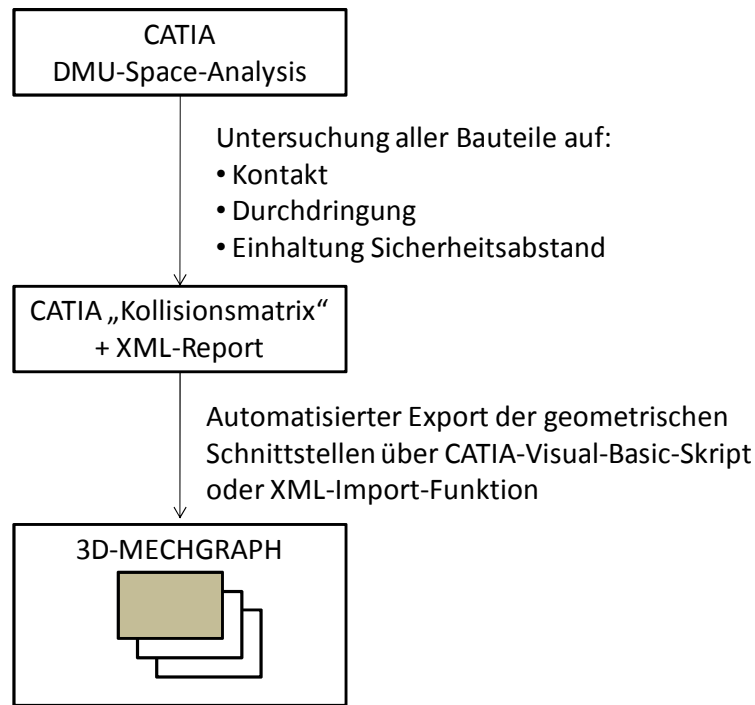


Abbildung 10-1: Ausblick: Konzept für die direkte Kopplung von CATIA und 3D-MECHGRAPH

Analog zu der in Abbildung 10-1 dargestellten Kopplung zwischen CAD und 3D-MECHGRAPH lassen sich PDM-Systeme anzapfen um die Betrachtungsdomäne Verantwortlichkeiten automatisiert abzuleiten. Die Integration der noch fehlenden funktionalen Sicht kann jedoch bis dato nicht automatisiert erfolgen, da die entsprechenden PDM-Systeme diese Sicht meist noch nicht unterstützen.

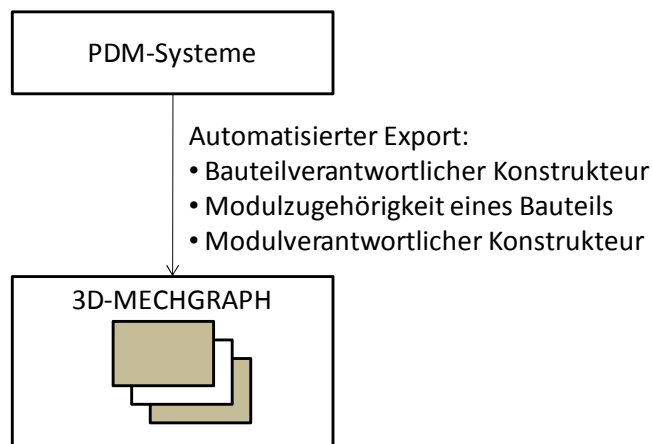


Abbildung 10-2: Ausblick: Konzept für die direkte Kopplung von PDM und 3D-MECHGRAPH

In Bezug auf eine weitere Steigerung der Intuitivität von 3D-MECHGRAPH bietet sich die Nutzung moderner Virtual Reality Technologie an. In Form von neuartigen dreidimensionalen Eingabegeräten kann die Strukturnavigation aber auch die Strukturdefinition unterstützt werden. Große 3D-Ausgabegeräte wie Powerwalls oder CAVE-Systeme bieten das Potential kritische Strukturen in einem interdisziplinären Team zu analysieren und zu diskutieren.

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Repräsentationsformen verwendet, aufgezeigt und entwickelt um die Vernetzung zwischen Funktionen des mechatronischen Systems, seiner Systemelemente, den verantwortlichen Personen und Absicherungsaktivitäten zu erarbeiten und darzustellen. Diese unterschiedlichen Sichten sollten in weiteren Forschungsaktivitäten noch stärker zusammengeführt werden und durch geeignete Werkzeuge unterstützt werden. Des Weiteren sollte eine enge Kopplung mit der merkmalsorientierten Sicht erfolgen. Eine Vision dieses Forschungsbedarfs ist in Abbildung 10-3 dargestellt. Die Abbildung zeigt ein Konzept eines Werkzeuges, welches die hierarchische Produktsicht, die Prozesssicht und 3D-MECHGRAPH miteinander verknüpft. Zusätzlich aufgeführt ist das in Kapitel 9 vorgestellte Spezifizierungsschema für Absicherungsaktivitäten. Hierüber könnten kontextspezifisch Detailinfos über die Absicherungsaktivitäten, die mit den Meilensteinen verbunden sind, aufgerufen werden.

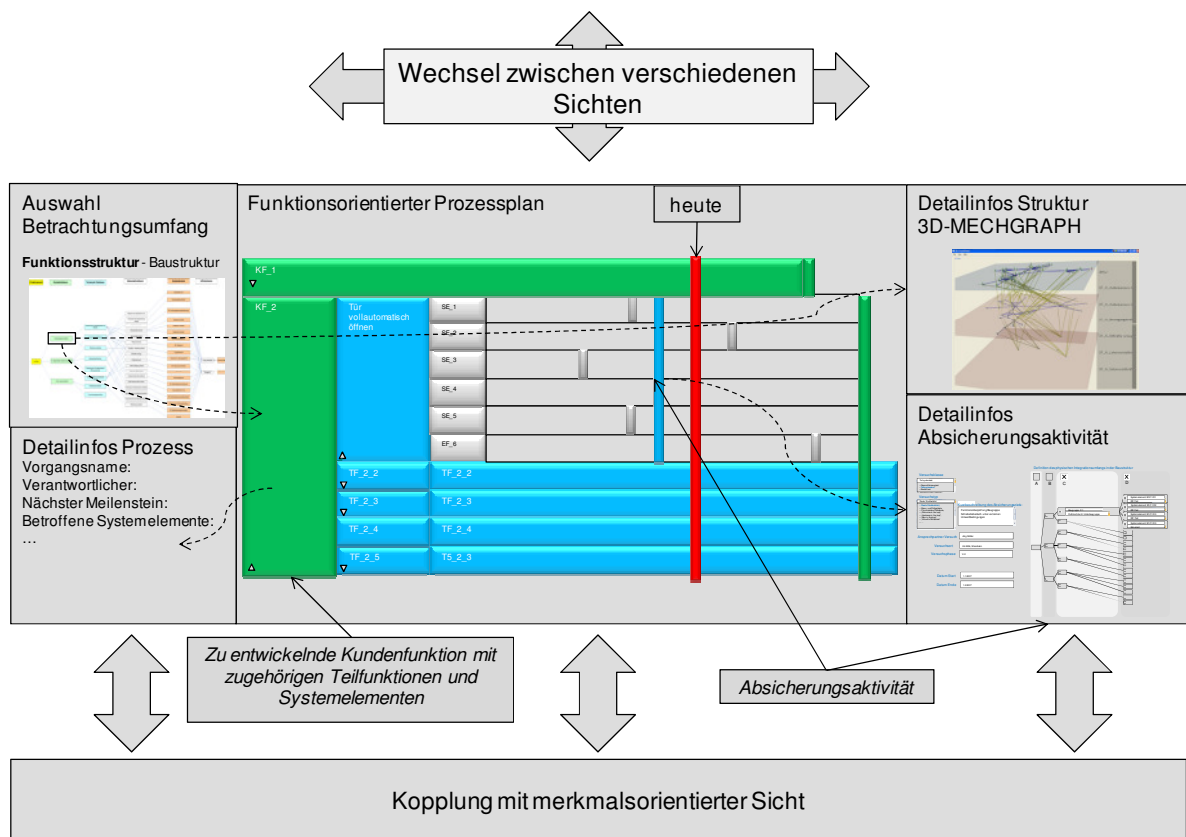


Abbildung 10-3: Ausblick: Kopplung verschiedener Sichten und Integration der merkmalsorientierten Sicht

Das in Kapitel 9 vorgestellte funktionsorientierte Integrationsmodell bildet eine vielversprechende Ausgangsbasis um neue Prozessmodellierungsansätze abzuleiten, die stärker an Funktionen als an Bauteilen orientiert sind (vgl. Abbildung 10-3 Mitte). Hierdurch würde dem verstärkten funktionalen Charakter der mechatronischen Automobilsysteme stärker gerecht. Zusätzlich stellt die Funktion das zentrale verbindende Element zwischen den einzelnen Disziplinen dar. Eine an Funktionen ausgerichtete Prozessmodellierungsmethode mit Absicherungsaktivitäten als zentrale Meilensteine bietet somit das Potential die getrennten Prozesswelten der einzelnen Disziplinen zu überwinden und zu einer integrierten Darstellung zu gelangen. Jedoch ist eine alleinig an Funktionen ausgerichtete Prozessmodellierung nicht ausreichend. Zusätzlich muss eine enge Kopplung mit der merkmals- und bauteilorientierten Sicht erfolgen.

Die im Rahmen der Vorstellung des funktionsorientierten Integrationsmodells (Kapitel 9.2.3) aufgezeigte Ableitung von interdisziplinären Integrationsteams und Reflektionsteams verspricht eine deutliche Verbesserung der interdisziplinären Kommunikation und somit des interdisziplinären Problemverständnisses. Dies sollte jedoch in der Praxis durch entsprechende Studien weiter evaluiert werden. Zur effizienten Nutzung der vorgestellten Ansätze sollte darüber hinaus eine softwaretechnische Umsetzung erfolgen. So sollte das aufgezeigte Spezifizierungsschema für Absicherungsaktivitäten mit einem PDM-System gekoppelt werden, um direkt, die für den Versuch notwendigen, Baustrukturmänge festlegen und identifizieren zu können.

11 Literaturverzeichnis

ABENDROTH, D. (2008)

Ein Entwickler über die Auto Start Stop Funktion. In: Emotion. BMW Kundenmagazin 01/07
[entnommen am: 17.4.2008 URL:
http://nl-muenchen.bmw.de/de/nl_muenchen/_filepool/emo_Muenchen_0107.pdf]

ALLEN, C. W. (1990)

Simultaneous Engineering. Integrating Manufacturing and Design.
Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers 1990.

ANDREASEN, M.; KÄHLER, S.; LUND, T.:

Montagegerechtes Konstruieren.
Berlin: Springer 1985.

ANDREASEN, M. M.; HEIN, L. (1987)

Integrated Product Development.
Berlin: Springer 1987.

ATA – ADVANCED TECHNOLOGY ASSESSMENT

Knowledge Bases
[entnommen am: 26.5.2008 URL:
<http://www.atalab.com/technology/index.php>]

BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. (2000):

Design Rules - The Power of Modularity. Vol. 1,
Cambridge: MIT Press 2000.

BALZERT, H. (2000):

Lehrbuch der Software-Technik. Software-Entwicklung. 2. Auflage
Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2000.

BENDER, K.; KATZ, M. (1993)

Profibus – the fieldbus for industrial automation
New York: Prentice Hall 1993.

BENDER-DEMOLL, S.; MCFARLAND, D., A. (2006)

The Art and Science of Dynamic Network Visualization. In: Journal of Social Structure.
Volume 7, Number 2
[entnommen am: 26.5.2008 URL:
<http://www.cmu.edu/joss/content/articles/volume7/deMollMcFarland/>]

BERNDES, S.; STANKE, A.:

Simultaneous Engineering als Strategie zur Überwindung von Effizienzsenken. In Bullinger, H. J.; Warschat, J. (Hrsg.): Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development. Stuttgart: Teubner 1997.

BICHLMAIER, C. (2000):

Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss.
2000.

BICHLMAIER, C.; GRUNWALD, S. (1998)

Prozessintegration mit Prozessbausteinen und ihre exemplarische Anwendung. In: Kolloquium zur Entwicklung umweltgerechter Produkte (3. und 4. November 1998).
Sonderforschungsbereich 392; Entwicklung umweltgerechter Produkte – Methoden, Arbeitsmittel und Instrumente, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, 1998. S. 103-106.

BOEHM, B. (1976)

Software engineering.
IEEE Transactions on Computers 25 (1976) 1226–1241

BOEHM, B. (1981)

Software Engineering Economics.
Englewood Cliffs: Prentice-Hall 1981.

BOEHM, B. (1988)

A Spiral Model for Software Development and Enhancement.
In: Computer 21 (1988) 5, S. 61 - 72.

BÖRNER, K.; CHEN, C.; BOYACK, K. (2003)

Visualizing Knowledge Domains. In: Annual Review of Information Science & Technology, Volume 37, 2003
Information Today: Medford 2003

BOSCH (2007)

Vernetzung im Kraftfahrzeug. Grundlagen der Vernetzung, Beispiele vernetzter Fahrzeuge, Bussysteme., Architektur elektronischer Systeme. Robert Bosch GmbH (Hrsg.)
Plochingen: Robert Bosch GmbH 2007

BRAUN, S.; DIEHL, H.; PETERMANN, M.; HELLENBRAND, D. (2007)

Function driven process design for the development of mechatronic systems. In: Lindemann, U.; Danilovic, M.; Deubzer, F.; Maurer, M.; Kreimeyer, M. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International DSM Conference. Munich 16-18.10.2008
Aachen: Shaker 2007.

BREASS, H. (2006)

Paradigmenwechsel im Automobilbau – eine übergreifende Betrachtung. In: ATZ –
Automobiltechnische Zeitschrift 01/2006.
Wiesbaden: GWV Fachverlage 2006.

BROSE (2008)

Mechatronische Systeme für Fahrzeugtüre- und sitze. Brose-Unternehmensgruppe Homepage
Entnommen am 21.2.2008, URL
http://www.brose.net/apps/download/download.cfm?file=de/data/pdf/mechatronische_systeme.pdf

BROWNING, T. (2001)

Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A
Review and New Directions.
IEEE Transactions on Engineering Management 48 (2001) 3, pp 292-306.

BROWNING, T. R.; EPPINGER, S. (2002)

Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development.
IEEE Transaction on Engineering Management 49 (2002) 4, pp 428–442.

BRUALDI, R. A.; RYSER, H. J. (1991)

Combinatorial Matrix Theory.
Cambridge: Cambridge University Press 1991.

BULLINGER, H.-J., WARSCHAT, J. (EDS) (1995)

Concurrent Simultaneous Engineering Systems.
Berlin: Springer 1995.

BULLINGER, H.-J.; KISS-PREUBINGER, E.; SPATH, D. (2003)

Automobilentwicklung in Deutschland – Wie sicher in die Zukunft? Chancen, Pontenziale und
Handlungsempfehlungen für 30 Prozent mehr Effizienz.
Stuttgart: Fraunhofer IRB 2003

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (2004)

2003 Zero Emission Vehicle Program Changes – Fact Sheet
Sacramento: ARB 2004
[entnommen am: 2.7.2008
<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/factsheets/2003zevchanges.pdf>]

CLARKSON, P. J.; SIMONS, C.; ECKERT, C. (2001)

Predicting Change Propagation in Complex Design. In: Proceedings of DETC'01: ASME 2001
Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering
Conference, Pittsburgh.
Pittsburgh: ASME 2001.

CLARKSON, P.J., HAMILTON, J.R. (2000)

'Signposting', A parameter-driven task-based model of the design process. In: Research in Engineering Design 12 (2000), pp.18-38
London: Springer 2000

COLLINS, C.; SHEELAGH, C. (2007)

VisLink: Revealing Relationships Amongst Visualizations. In: IEE Information Visualization, pp. 20-28

DAIS, S. (2004)

Herausforderungen eines Automobilzulieferers. In: Automobiltechnische Zeitschrift – ATZ, 106 (Sonderheft 100 Jahre VDI-FVT): S 18-20. 2004

DAENZER, W.; HUBER, F. (1999)

Systems Engineering – Methoden und Praxis, 10. verbesserte Auflage
Zürich: Verlag Industrielle Organisation 1999.

DANILOVIC, M.; BÖRJESSON, H. (2001A):

Managing the Multiproject Environment. In: Proceedings of the 3rd Dependence Structure Matrix (DSM) International Workshop, Cambridge.
Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology 2001.

DANILOVIC, M.; BÖRJESSON, H. (2001B):

Participatory Dependence Structure Matrix Approach. In: Proceedings of the 3rd Dependence Structure Matrix (DSM) International Workshop, Cambridge.
Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology 2001.

DANILOVIC, M.; SANKULL, B. (2005)

The Use of Dependence Structure Matrix and Domain Mapping Matrix in managing Uncertainty in multiple Project Situations. In: International Journal of Project Management 23. Cambridge (UK): Elsevier 2005.

DETTMERING, J., H. (2007)

Disziplinübergreifendes Datenmanagement im automobilen Entwicklungsprozess. Zugl. München: TU, Diss. 2007.

DEMING, W. E. (1989)

Out of the Crisis.
Cambridge: MIT Press 1989.

DI BATTISTA, G.; EADES, P.; TAMASSIA, R.; TOLLIS, I. G. (1999)

Graph Drawing: Algorithms for the Visualization of Graphs.
Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall 1999.

DIEHL, H.; STÖBER, R. (2007)

Das Netzwerk der W.E.T Automotive Systems AG. In: Schuh, G.; Schlick, C.; Lindemann U. (Hrsg.): Integriertes Wissensmanagement in Netzwerken. (Reihe 16 Technik und Wissenschaft,

Nr. 182), S. 196 – 211
Düsseldorf: VDI 2007.

DIEHL, H.; ZIEGLER, W. (2007)

Das Netzwerk der Bauer Maschinen GmbH. In: Schuh, G.; Schlick, C.; Lindemann U. (Hrsg.):
Integriertes Wissensmanagement in Netzwerken. (Reihe 16 Technik und Wissenschaft, Nr.
182), S. 178 – 195
Düsseldorf: VDI 2007.

DIEHL, H.; HELLENBRAND, D.; LINDEMANN, U. (2008)

Transparent 3D Visualization of mechatronic system structures. In: Proceedings of the 10th
international design conference, May 19 – 22, 2008 Dubrovnik Croatia
Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb,
Design Society, Glasgow 2008.

DIN-69901

Deutsche-Industrie-Norm 69901: Projektmanagement – Projektmanagementsysteme
Berlin: Beuth 2007

DOHMEN, W. (2002)

Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer
Systeme.
München: Herbrt Utz Verlag (Forschungsberichte IWB, Band 174)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2002

DÖRNER, D. (1992)

Die Logik des Misslingens.
Reinbek: Rowohlt Taschenbuch Verlag 1992.

EVERSHEIM, W.; BOCHTLER, W.; LAUFENBERG, L. (1995)

Simultaneous Engineering.
Berlin: Springer 1995.

EVERSHEIM, W.; SCHUH, G. (2005)

Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.
Berlin: Springer 2005.

EHRENSPIEL, K.; IGENBERGS, E.; KLEEDÖRFER, R.; NEGELE, H. (1996)

Systemtechnisches Modell des zeitlichen Ablaufs der Entwicklung eines Automobils. In:
Endberichte Bayerischer Forschungsverbund Systemtechnik 1993-1995.
München: TU, 1996, S. 255-280.

EHRENSPIEL, K. (2007)

Integrierte Produktentwicklung – 3. Auflage
München: Hansa 2007.

EPPINGER, S. D.; SALMINEN, V. (2001)

Patterns of Product Development Interactions. In: Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design (ICED 01), Glasgow.
Bury St. Edmunds: IMechE 2001.

FELGEN, L. (2007)

Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.
Zugl. München: TU, Diss. 2007.

FLOYD, C.; OBERQUELLE, H. (2001)

Softwaretechnik und Software-Ergonomie, Vorlesung 5: Vorlesung: Software-Entwicklungsprojekte. Software Engineering Group. Universität Hamburg
[entnommen am 26.3.2008 URL:
<http://www.informatik.uni-hamburg.de/SWT/attachments/LVTermine/03-Wasserfallmodell.pdf>]

FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V. (2008)

Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger. Homepage der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V.
[entnommen am 24.2.2008, URL:
<http://www.faps.uni-erlangen.de/mid/fs.html>]

FRANK, U. (2005):

Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstopmierender Systeme.
Paderborn: Heinz-Nixdorf Institut (HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175)
Zugl. Paderborn: Universität, Diss. 2005

FRANKE, H.-J.; HESSELBACH, J.; FIRCHAU, N. L.; HUCH, B. (2002)

Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung.
München: Hanser 2002.

FIRCHAU, N., L.; FRANKE, H.-J. (2002)

Methoden zur Variantenbeherrschung in der Produktentwicklung. In: FRANKE, H.-J.; HESSELBACH, J.; HUCH, B.; FIRCHAU, N. L. (HRSG.): Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. München: Hanser 2002, S. 52-86.

FLANAGAN, T. L.; ECKERT, C. M.; SMITH, J.; EGER, T.; CLARKSON, P. J. (2003):

A Functional Analysis of Change Propagation. In: Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED 03), Stockholm.
Stockholm: Design Society 2003.

GALL, J.:

Systematics: How Systems Really Work and How They Fail. Zweite Aufl.
Ann Arbor, MI: The General Systemantics Press S. 65

GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J. (2000)

Entwicklungsumgebung Mechatronik: Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme
Paderborn: HNI 2000.

GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P; KALLMEYER, F. (2001)
Produktinnovation - Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen.
München: Hanser 2001.

GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; STEFFEN, D (2005)
Entwicklung selbstoptimierender Systeme. In: Konstruktion, 57. Jahrgang, Heft 10, 2005

GAUSEMEIER, J.; FRANK, U. (2006)
Stand und Perspektiven der Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächler, A.; Wallaschek, J.(Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme: Grundlagen, Methoden, Werkzeug, Adaption, Selbstoptimierung, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung. 4. Paderborner Workshop, 30.-31.03.2006. Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe, Bd. 89, 2006, S. 1-24.

GAUSEMEIER, J.; PEITZ, T. (2006)
MID-Studie 2006; MID-Markt Deutschland; Analyse von MID-Projekten
Erlangen: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. 2006.

GAUSEMEIER, J.; HAHN, A.; KESPOHL, H.-D.; SEIFERT, L. (2006)
Vernetzte Produktentwicklung: Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking
München: Hanser 2006

GESSNER, K.(2001)
Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung.
Berlin: TU, Diss., 2001

GEHRKE
Entwurf mechatronischer Systeme auf Basis von Funktionshierarchien und Systemstrukturen
Zugl. Paderborn: Universität, Diss. 2005
[entnommen am 5.5.2007 URL:
http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=980096669&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=980096669.pdf]

GIERHARDT, H. (2001)
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte, Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.

GÖPFERT, J. (1998)
Modulare Produktentwicklung: zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation.
Wiesbaden: Dt. Univ. Verl. Zugl. München: Universität 1998.

GÖTZ, A.; MAIER, T. (2006)

Design for Humans - Differenzierung und Integration von Konstruktion und Technischem Design in der Produktentwicklung. In: 17: Symposium "Design for X".
Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen 2006.

GOMEZ, P.; PROBST, G. (1997)

Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens. 2nd Ed.,
Bern: Paul Haupt 1997.

GRABNER, J.; NOTHHAFT, R. (2005)

Konstruieren von Pkw-Karosserien -Grundlagen, Elemente und Baugruppen;
Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5
3., erweiterte Auflage
Berlin: Springer 2005

GRABOWSKI, H.; ANDERL, R.; ERB, J.; POLLY, A. (1993):

Integriertes Produktmodell.
Berlin: Beuth 1993

GRABOWSKI, H.; GEIGER, K. (HRSG.) (1997)

Neue Wege zur Produktentwicklung
Stuttgart: Raabe 1997

GRADY, BOOCH (1994)

Objektorientierte Analyse und Design: Mit praktischen Anwendungsbeispielen,
Bonn: Addison-Wesley 1994.

GROMER, J. (2004)

„Die Komplexität bestimmt der Kunde“. Entwicklung – Interview. In: Automobiltechnische Zeitschrift. Band 1/2004, S.40-43

GROSS, J. L.; YELLEN, J. (2006)

Graph Theory and its Applications. 2nd Ed.,
Boca Raton: Chapman & Hall/CRC 2006.

HACKER, W. (1998)

Allgemeine Arbeitspsychologie: psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten.
(Schriften zur Arbeitspsychologie/Nr. 58)
Bern: Hans Huber 1998.

HUBER, R., J (2001)

Funktionsmodellierung und Lösungsfindung mechatronischer Produkte
Zugl. Karlsruhe: Universität, Diss. 2001

HILLERINGMANN, U. (2006)

Mikrosystemtechnik - Prozessschritte, Technologien, Anwendungen ; mit 13 Tabellen
Wiesbaden: Teubner 2006.

ISERMANN, R. (2008)

Mechatronische Systeme: Grundlagen. 2. Auflage
Berlin: Springer 2008

ISO/IEC (1996)

International Standard 749811; Information technology; Open Systems; Interconnection; Basic Reference Model: The Basic Model
[entnommen am 25.2.2008 URL:
<http://standards.iso.org/ittf/licence.html>]

JACOBI, G. (2003):

Software ist im Auto ein Knackpunkt – Programmierungsproblematik ist Ursache für drei Viertel aller Elektronikausfälle. In: VDI-Nachrichten, 28.2.2003, S.8

THILO, J. (2005)

Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Produkt-Prozessmodells mit dem Ziel der durchgängigen Komplexitätsbewertung.
Zugl. Paderborn: Universität, Diss 2005

KALLENBACH, E.; BIRILI, O.; SAFFERT, E.; SCHÄFFEL, C., (1997)

Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. In: Tagung Mechatronik im Maschinen und Fahrzeugbau, Moers, 10.-12. März 1997. VDI Berichte 1315.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

KALLMAYER, F. (1998)

Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, 1998
Zugl. Paderborn: Universität Paderborn Fachbereich Maschinentechnik, Diss. 1998

KLEINEVOSS, S. (2006)

Integrativ gesteuerte Entwicklung von mechatronischen Systemen. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächler, A.; Wallaschek, J.(Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme: Grundlagen, Methoden, Werkzeug, Adaption, Selbstoptimierung, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung. 4. Paderborner Workshop, 30.-31.03.2006.
Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe, Band 189, 2006.

KLEEDÖRFER, R. (1999)

Prozess und Änderungsmanagement in der integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1999.
Zugl. München: TU, Diss. 1998

KOSTAL (2005)

Technik und Entwicklung - NEUE PRODUKTE - Alle Funktionen unter einem Dach: Im Funktionszentrum Dach des 1er BMW kombiniert Kostal Bedien- und Beleuchtungselemente sowie ein Gateway. In: Automobil Produktion 2005

KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006)

Jahresbericht 2006.

[entnommen am: 22.02.2008, URL:

<http://www.kba.de/Stabsstelle/Presseservice/Jahrespressebericht/jpb2006.pdf>]

KROTTMAIER, J. (1995)

Leitfaden Simultaneous Engineering: Kürzere Entwicklungszeiten, niedrige Kosten, hohe Qualität.

Berlin: Springer 1995

KUEHNE, B.; MARTZ, P. (2007)

Open Scene Graph Reference Manual v2.0

Ann Arbor USA: Blue Newt Software, LLC 2007

LÉVÁRDY, V.; HOPE, M.; BROWNING, T. (2004)

Adaptive test process – an integrated modeling approach for test and design activities in the product development process. In: Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference
Salt Lake City: ASME 2004.

LINCKE, W. (1995)

Simultaneous Engineering - Neue Wege zu überlegenen Produkten.

München: Carl-Hanser 1995.

LINDEMANN, U.; KLEEDÖRFER, R. (1997)

Erfolgreiche Produkte durch Integrierte Produktentwicklung, in: Reinhardt, G.; Milberg, J. (Hrsg): Mit Schwung zum Aufschwung, Müncher Kolloquium 1997

Landsberg am Lech: Moderne Industrie 1997

LINDEMANN, U.; KLEEDÖRFER, R.; GERST, M. (1998):

The Development Department and Engineering Change Management. In: Frankenberger, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H. (Eds.): Designers: The Key to Successful Product Development.

London: Springer 1998, pp 169-182.

LINDEMANN, U. (2007):

Methodische Entwicklung technischer Produkte.

Berlin: Springer 2007.

LINDEMANN, U.; HÜBNER, W. (2007)

Energiemanagement: Analyse und virtuelle Abbildung der energetischen Zusammenhänge im Kraftfahrzeug. In: ATZ/MTZ-Konferenz Energie 2007, München, 26.-27.06.2007.

München: Vieweg 2007

LIPPOLD, C. (2001)

Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme.

Aachen: Shaker, 2001 (Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik, Bd. 2000,9).

Zugl. Bochum: Universität, Diss. 2000.

LÜCKEL, J.; KOCH, T.; SCHMITZ, J. (2000):

Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: Tagungsband zu VDI-Tagung „Mechatronik – Mechanisch-elektrische Antriebstechnik“, 29./30. März 2000, Wiesloch
Düsseldorf: VDI 2000.

MAGRAB, E. (1997)

Integrated product and process design and development, The product realization process.

New York: CRC Press 1997.

MARTZ, P. (2007)

OpenSceneGraph Quick Start Guide – A Quick Introduction to the Cross-Platform Open Source Scene Graph API.

Mountain View California: Computer Graphics Systems Development Corporation 2007

MAURER, M.; PULM, U.; BALLESTREM, F.; CLARKSON, J.; LINDEMANN, U. (2006)

The Subjective Aspects of Design Structure Matrices – Analysis of Comprehension and Application and Means to Overcome Differences. In: Proceedings of the 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ASME-ESDA06), Torino. Torino, Italy: ASME 2006.

MAURER, M. (2007):

Structural Awareness in Complex Product Design.

München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band ??)

MAURER, M.; LINDEMANN, U. (2007):

Facing Multi-Domain Complexity in Product Development.

Cidad Working Paper Series 3 (2007) 1, pp 1-12.

MEERKAMM, H.(HRSG.) (1998):

Fertigungsgerechtes Konstruieren. Beiträge zum 9. Symposium, Schnaittach, 15. und 16. Oktober 1998

Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Univ. Erlangen-Nürnberg, 1998.

MILLER, G. A.; GALANTER, E.; PRIBRAM, C. (1973)

Strategien des Handelns.

Stuttgart: Klett-Cotta 1973.

MÖHRINGER, S. (2004)

Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.

Paderborn: Universität, Habilitationsschrift 2004.

MÖHRINGER, S. (2005)

Gibt es ein gemeinsames Vorgehen in der Mechatronik? In: In: VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik: Tagung Mechatronik 2005, Wiesloch, 1.06-02.06.2005. (VDI-Berichte 1892.1, S.229-272)

NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION) (1995):

NASA Systems Engineering Handbook. SP-6105,

[entnommen am: 1.3.2008, URL:

http://ldcm.nasa.gov/library/Systems_Engineering_Handbook.pdf]

N.DESIGNSTUDIO (2008)

CSS Dock Menu

[entnommen am 6.6.2008 URL:

<http://www.ndesign-studio.com/blog/mac/css-dock-menu>]

OLFERT, K. (2004)

Projektmanagement – Kompakt Training.

Ludwigshafen: Kiehl 2004

OPENSCEENGRAPH (2008)

Welcome to OpenSceneGraph

[entnommen am 5.6.2008 URL:

<http://www.openscenegraph.org/projects/osg>]

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H. (2005)

Konstruktionslehre. 6. Auflage.

Berlin: Springer, 2005.

PERKINS, C. (2001)

Ad Hoc Networking.

Boston: Addison Wesley 2001.

PONN, J.; LINDEMANN, U. (2008)

Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte – systematisch von Anforderungen zu Konzepten.

Berlin: Springer 2008.

REICHART, G. (2005)

“Systems Engineering – ein neues Entwicklungsparadigma für die Automobilentwicklung?“

9. Euroforum Tagung Elektronik-Systeme im Automobil.

München

REISIN, F.-M. (2004)

Vorlesung: Software Engineering, Vorlesung 3 20.10.2004.

Technische Fachhochschule Berlin, Fachbereich Informatik

[entnommen am: 26.3.2008 URL:

http://www.tfh-berlin.de/~reisin/SWE_COM/SEVL3/SWT13EinSeit.pdf]

- REINHART, G.; LINDERMAIER, R.; KUBA, R. (1995)
Im Schwitzkasten von Kosten und Zeit.
Produktion (1995) 38, S. 3
- REINHART, G.; ANTON, O.; LERCHER, B. (2001)
Funktionsorientiertes Sichtenmodell für die Entwicklung mechatronischer Systeme.
Interdisziplinäre Abhängigkeiten strukturieren und beherrschen. In: VDI-Z Integrierte
Produktion. VDI-Z 11-12/2001, Seite 67
- RENNER, I. (2007):
Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel
Automobil.
Zugl. München: Technische Universität München, Diss. 2007.
- RIGGERT, W. (2003)
Netzwerktechnologien
München: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag 2003.
- RODENACKER, W. (1991)
Methodisches Konstruieren. Nummer 27 in Konstruktionsbücher 4. Auflage.
Berlin: Springer 1991.
- SAGE A.P. (1992)
Systems Engineering.
New York: John Wiley & Sons 1992.
- SAPUAN, S.; OSMAN, M.; NUKMAN, Y. (2006)
State of the art of the concurrent engineering technique in the automotive industry. In: Journal
of Engineering Design. Vol. 17, No. 2, April 2006, S. 143-157
London: Taylor & Francis 2006.
- SCHÖN, A.:
Konzept und Architektur eines Assistenzsystems für die mechatronische Produktentwicklung.
Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg, Diss. 2000.
- SCHUH, G.; SCHWENK, U. (2001)
Produktkomplexität managen.
München: Hanser 2001.
- SCHUH, G.; SCHLICK, C.; LINDEMANN, U. (2007)
Integriertes Wissensmanagement in Netzwerken. (Reihe 16 Technik und Wissenschaft, Nr. 182)
Düsseldorf: VDI 2007.
- SCHULLER, J.; HANEBERG, M. (2003)
Funktionale Analyse – eine Methode für den Entwurf hochvernetzter Systeme. In: VDI-
Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik (Hrsg.); 5. Mechatroniktagung 2003 – Innovative

Produktentwicklung, 7.-8. Mai 2003, Fulda.
Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht Nr. 1753, 2003.

SCHWEITZER, G. (1989)

Mechatronik-Aufgaben und Lösungen. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.): Kontrollierte Bewegungen - Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Tagung Bad Homburg , 29-30 November 1989
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.

SCHWEIGER, W.; SCHÖN, A. (1997)

Digital Mock-up bei der Entwicklung mechatronischer Produkte. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Beiträge zum 8.Symposium Fertigungsgerechtes Konstruieren.
Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Univ. Erlangen-Nürnberg

SEKOLEC, R. (2005)

Produktstrukturierung als Instrument des Variantenmanagements in der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2005 (zugl. Diss. ETH Zürich 2005).

SEELIGER, P. (2008)

Elektronik und Software im modernen Kraftfahrzeug – neue Herausforderungen für Ingenieure. EDAG – Lösungen vom Konzept zur Serie.
[entnommen am: 14.4.2008 URL:
http://www.hs-fulda.de/fileadmin/Fachbereich_ET/Schaukasten/Schaukasten_2007/ET-Seminar/Dateien/ET-Seminar2007_Selliger_EDAG.pdf]

SOSA, M. (2005):

A Network Approach to Define Component Modularity. In: Proceedings of the 7th International Dependency Structure Matrix (DSM) Conference, Seattle.
Seattle, USA: Boeing 2005.

SOSA, M.; EPPINGER, D.; ROWLES, C. (2007)

Wie sie ihre Ingenieure zum Reden bringen. In: Harvard Business Manager Heft 12/2007, S.56-72
Hamburg: manager magazin Verlagsgesellschaft 2007

SPINCZYK, O.; STREICHER, J. (2008)

Auto Lab: Eine Experimentierplattform für automotive Softwareentwicklung
[entnommen am: 17.4.2008 URL:
<http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/autolab/AutoLab-lang.pdf>]

SPUR, G.; UHLMANN, E.; ISING, M. (1999):

Virtualisierung der Werkzeugmaschinenentwicklung.
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb; 1999/12 S. 740–745, 1999.

SPUR, G.; KRAUSE, F.,L. (1997):

Das virtuelle Produkt, Management der CAD-Technik.
München: Carl-Hansa-Verlag, 1997.

STERLER, G.; RUDOLPH, M.; GIRGSDIES, U. (2007)

Reifeprüfung – Innovative Testprozesse und neue Methoden der Fehlerprävention. In:
Elektronik Automotiv. Sept.07 /Sonderheft Audi A4.
Poing: Weka Fachmedien 2007

STEWART, D. (1962):

On an Approach to the Analysis of the Structure of Large Systems of Equations.
SIAM Review 5 (1962), pp 321–342.

STEWART, D. (1981):

The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems.
IEEE Transaction on Engineering Management 28 (1981) 3, pp 79-83.

STEINMEIER, E. (1998)

Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der PKW-Entwicklung
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 1998

TERNINKO, J. (1998)

Systematic Innovation: an introduction to TRIZ.
Boca Raton: St. Lucie Press 1998.

TESEON (2008)

Hompag der Teseon GmbH. complexity under control
[entnommen am: 1.12.2007 URL:
<http://teseon.de>]

TEICH, J. (1997)

Digitale Hardware/Software Systeme.
Heidelberg: Springer 1997.

THILO, J. (2005)

Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Produkt- und Prozessmodells mit dem Ziel
einer durchgängigen Komplexitätsbewertung.
Paderborn: Bonifatius. Zugl. Paderborn: Universität, Diss. 2004.

TU-MÜNCHEN (2007)

Energiemanagement. Kooperationsprojekt zwischen der BMW AG und der TU-München –
unveröffentlichter Abschlussbericht.
München: Technische Universität 2007.

TU-MÜNCHEN (2008)

MechaTUM-Phase 2.
Nicht veröffentlichter Abschlussbericht Kooperationsprojekt zwischen der BMW AG und der

TU-München.

München: Technische Universität 2008.

V-MODELL 97 (1997)

Entwicklungsstandard für IT-Systeme des Bundes, Vorgehensmodell, Teil 1: Regelungsteil, Teil 3: Handbuchsammlung, Allgemeiner Umdruck Nr 250/1 Juni 1997, BWB IT 15, Koblenz 1997.

V-MODELL XT (2005)

Teil 1: Grundlagen des V-Modells.

[entnommen am 27.3.2008 URL:

<http://ftp.uni-kl.de/pub/v-modell-xt/Release-1.2/Dokumentation/pdf/V-Modell-XT-Teil1.pdf>]

VDI-VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1993)

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

Berlin: Beuth 1993.

VDI-VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1994)

VDI/VDE-Richtlinie 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik.

Berlin: Beuth 1994

VDI-VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1997)

VDI-Richtlinie 2222: Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.

Berlin: Beuth 1997.

VDI-VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2004)

VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.

Berlin: Beuth 2004.

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (2005)

Auto Jahresbericht 2005

Frankfurt: V.D.A 2005

VISUAL COMPLEXITY 2007

A visual exploration on mapping complex networks.

[entnommen am 3.12.2007, URL:

<http://www.visualcomplexity.com/vc/method.cfm>]

VW 2008

Forschungsverbund Fahrzeugsysteme. Universität Kassel

[entnommen am 1.6.2008 URL:

www.uni-kassel.de/fb16/fsg/bilder/phaeton_bordnetz.jpg]

WALDROP, M.:

Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos.
New York: Simon and Schuster, 1992.

WALKER, D. (1985)

A Model of Design Representation and Synthesis. In: Proceedings of 22nd Automation Conference
Baltimore: ACM 1985

WALTHER, C. (2001)

Systemtechnische Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionen großer Systeme – Methoden zur Darstellung von Änderungen.
München: Utz München 2001.

WARKETIN, A.;HERBST, J. (2007)

Funktionsorientierung bei PLM-Systemen: Eine Analyse des Standes der Technik. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächler, A.; Wallaschek, J.(Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme: Grundlagen, Methoden, Werkzeug, Adaption, Selbstoptimierung, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung. 5. Paderborner Workshop, 22.-23.03.2007.
Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe, Bd. 210, 2007, S.335-349.

WEBER, C. (2005):

What Is “Complexity”? In: Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED 05), Melbourne.
Melbourne: Institution of Engineers 2005.

WIKIPEDIA (2008)

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie: Extensible Markup Language
[entnommen am 4.6.2008 URL:
http://de.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language]

WIKIPEDIA (2008B)

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie: Morphing
[entnommen am 8.6.2008 URL:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Morphing>]

WULF, J. (2002)

Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002.(Produktentwicklung München, Band 50)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.

ZWICKY, F.(1966)

Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild.
München: Droemer Knauer 1966.

ZÄH, M., F., EHRENSTRASSER, M., GUSERLE, R., LERCHER, B.

Integration von Simulationsmodellen im Werkzeugmaschinenbau
Düsseldorf: VDI-Z 03/2003

12 Anhang

12.1 Konzepte für integrative Modellierungstechniken

Die folgenden Abbildungen zeigen am Beispiel Schiebebedach im Rahmen dieser Arbeit entstandene Konzepte zur strukturierten Vernetzung der Systemmodellierungsmethoden: Relationsorientiertes Funktionsmodell, Sequenzdiagramm und Wirkstruktur nach GEHRKE [2005].

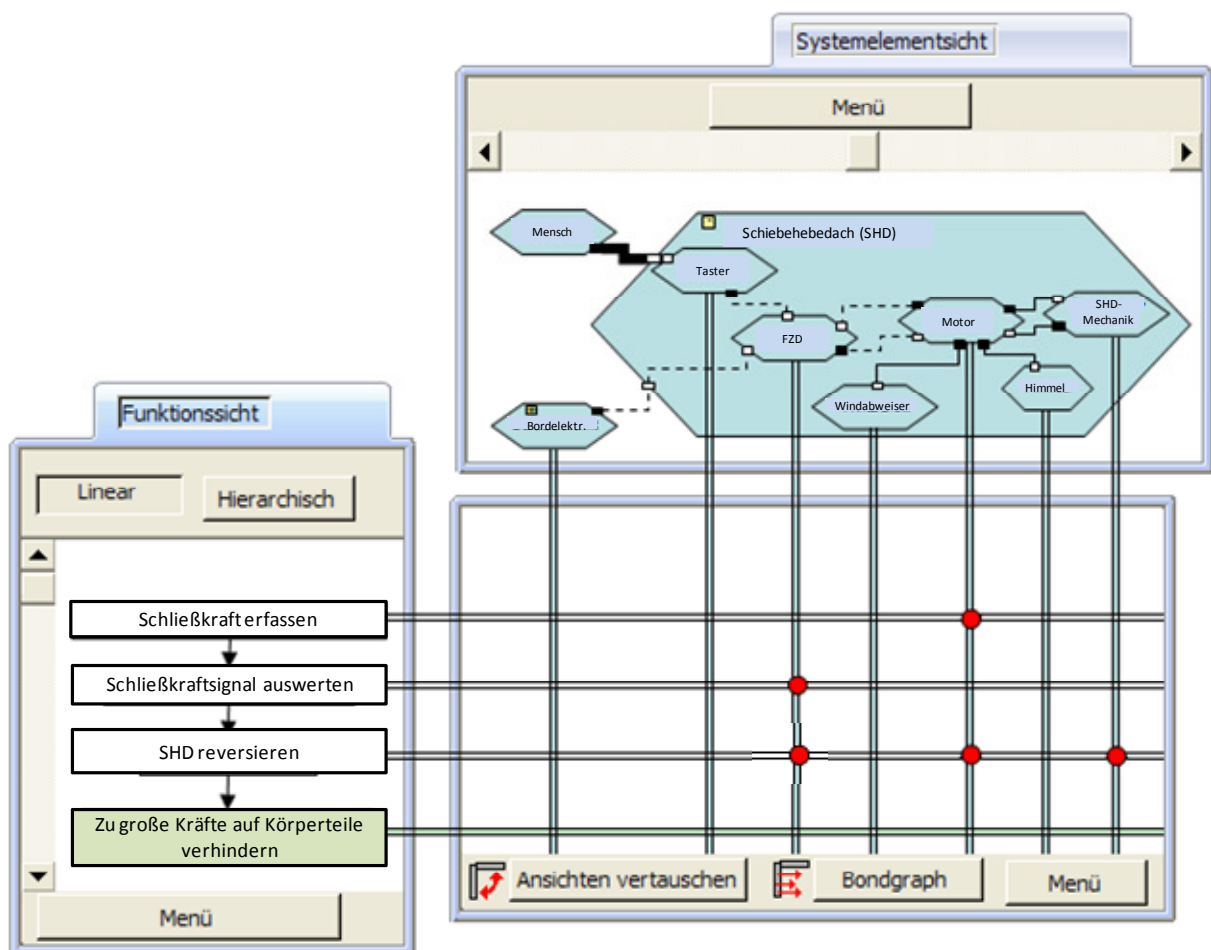


Abbildung 12-1: Kopplung zwischen relationsorientierter Funktionsstruktur und Wirkstruktur (Ausschnitt)

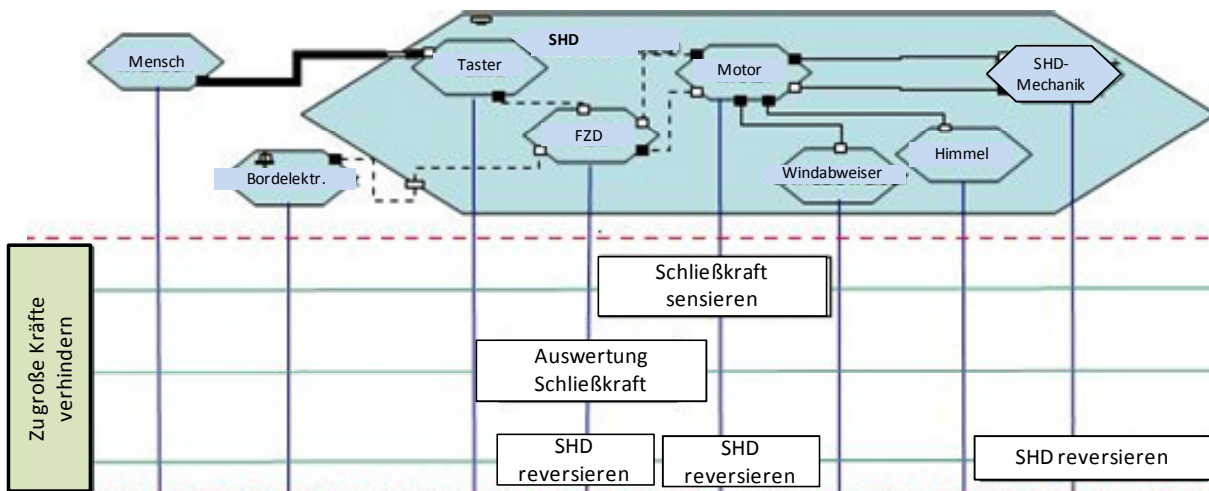


Abbildung 12-2: Kopplung von Wirkstruktur und Sequenzdiagramm: Alternative 1 (Ausschnitt)

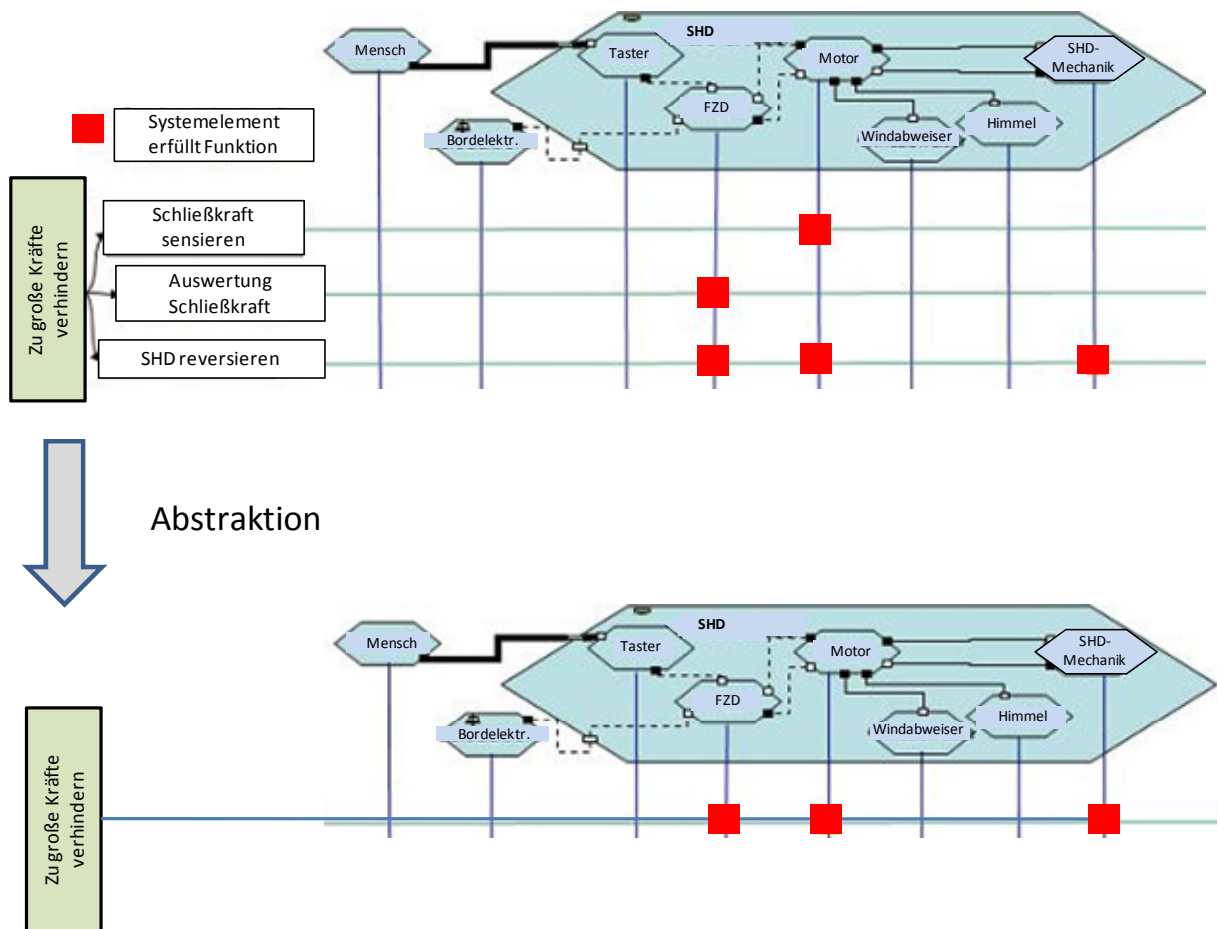


Abbildung 12-3: Kopplung von Wirkstruktur und Sequenzdiagramm: Alternative 2 (Ausschnitt)

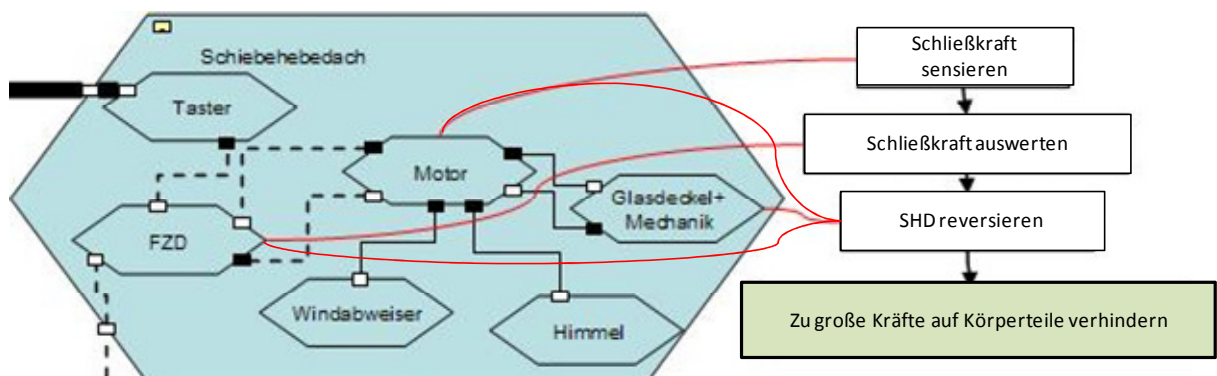


Abbildung 12-4: Direkte Zuordnung von Funktionen in der Wirkstruktur (Ausschnitt)

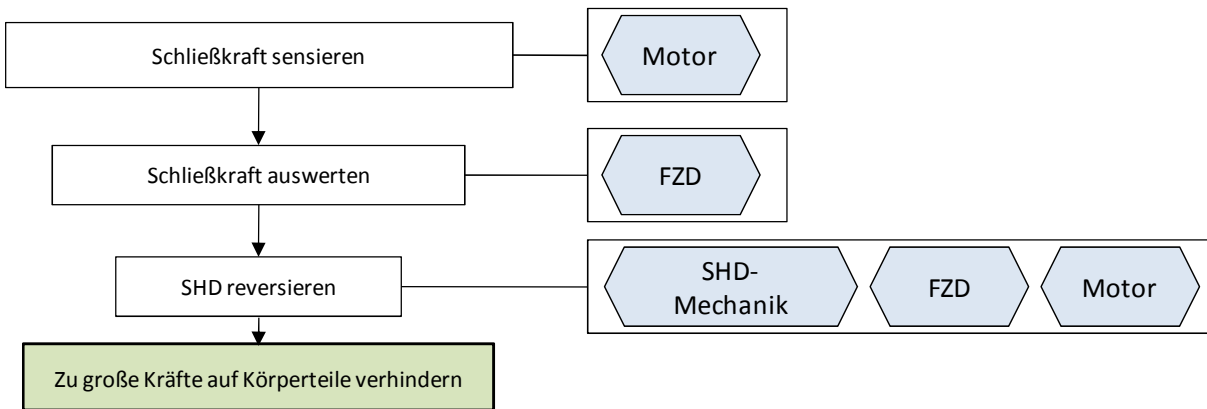
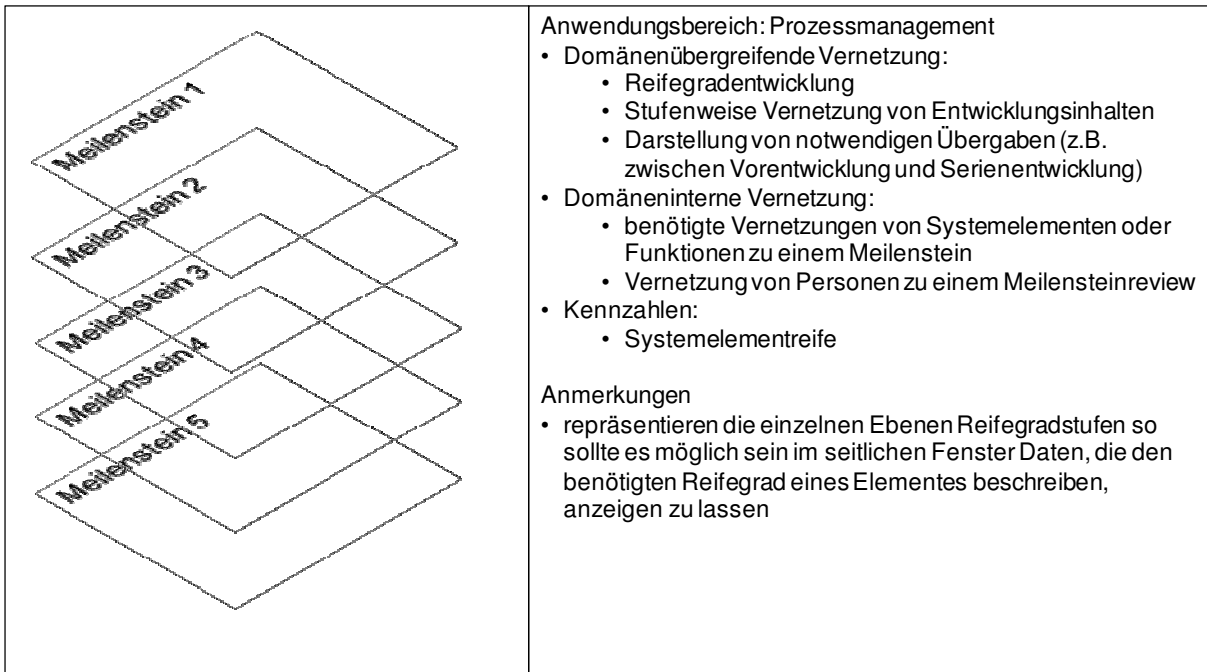


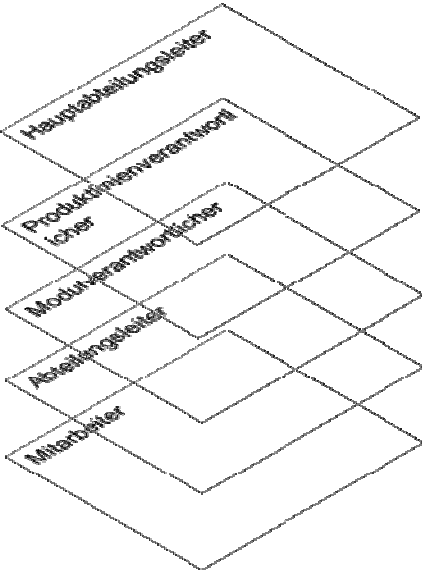
Abbildung 12-5: Zuordnung von Systemelementen zur relationsorientierten Funktionsstruktur (Ausschnitt)

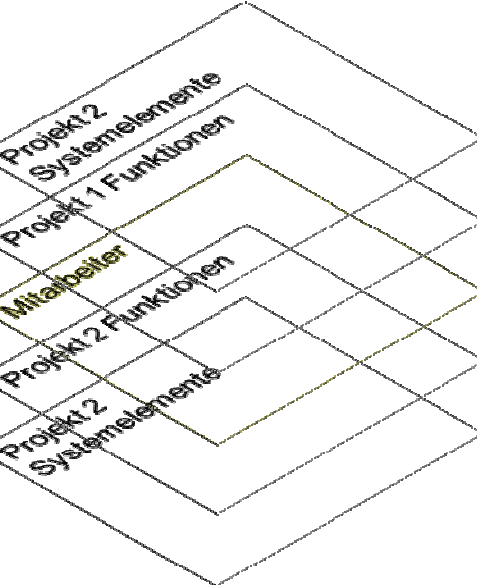
12.2 Anwendungspotentiale 3D-MECHGRAPH

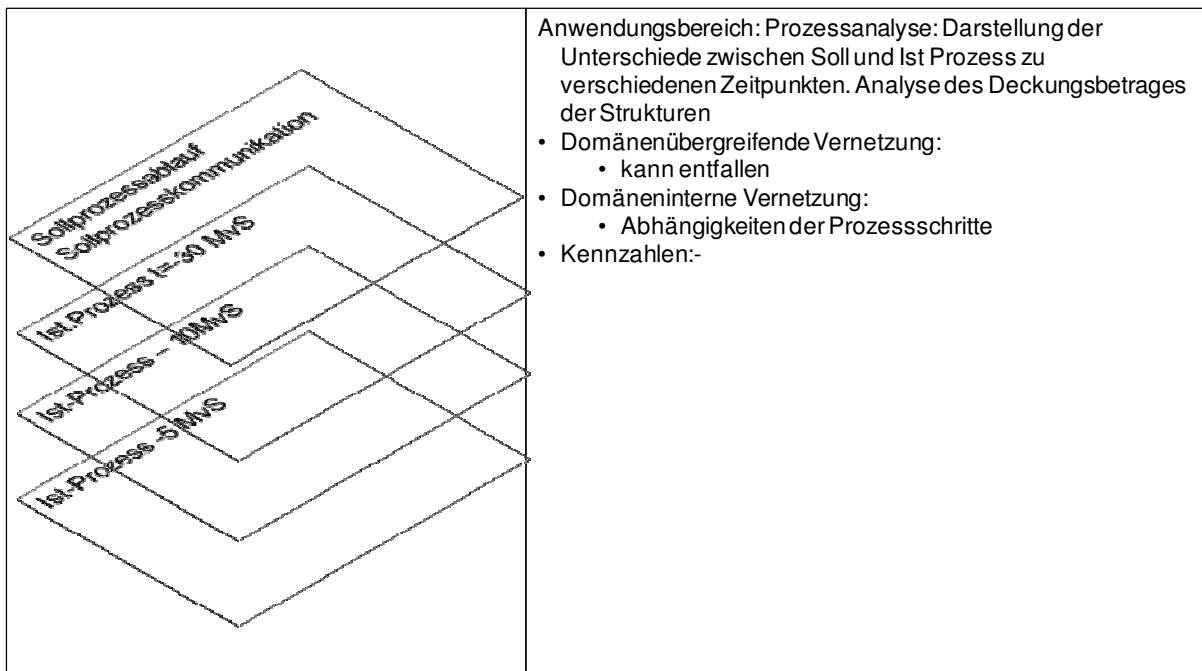
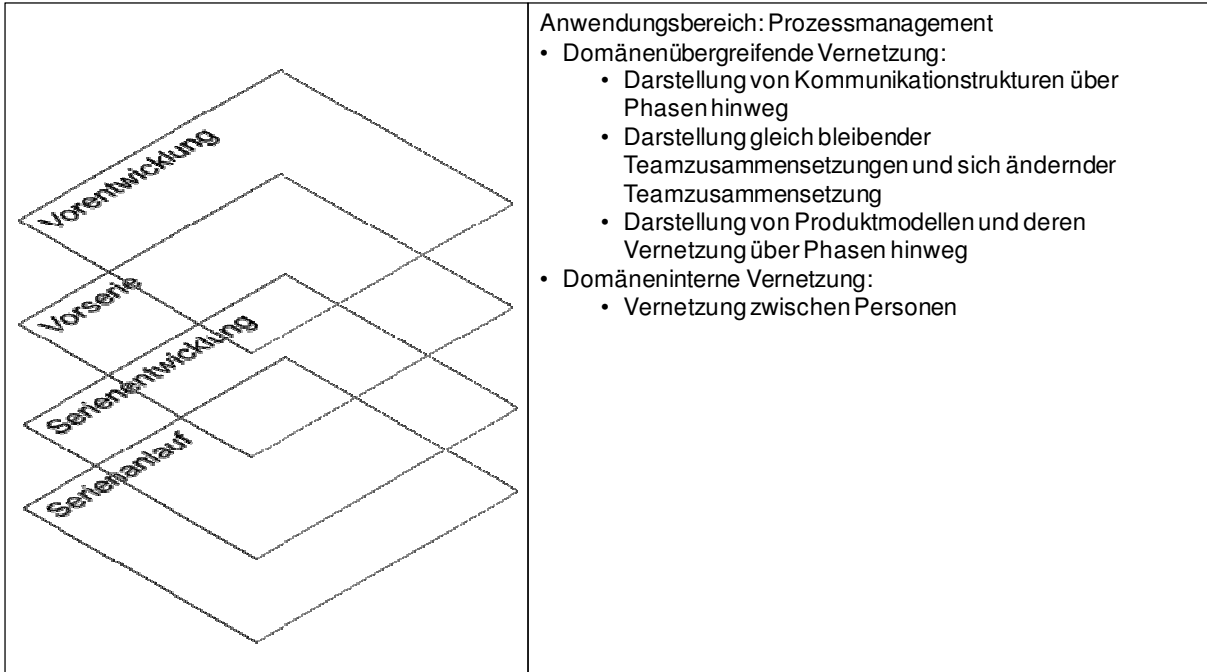
Prozesse:



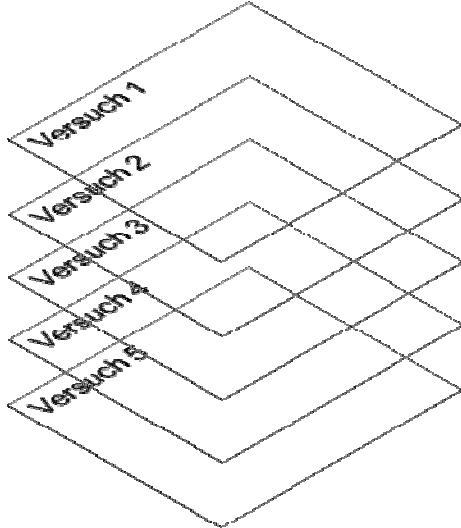
Aufbauorganisation und Verantwortungsstrukturen:

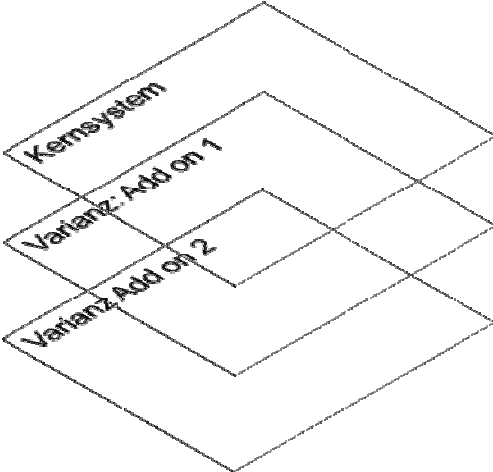
	<p>Anwendungsbereich: Aufbauorganisation,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Domänenübergreifende Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Darstellung von Entscheidungsstrukturen in Bezug auf einen Aspekt (z.B. Änderungsanträge). • Darstellung der Informationsweiterreichung (z.B. Versuchsergebnisse). • Domäneninterne Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationsflüsse Bezugen auf das Betrachtungsobjekt innerhalb einer Hierarchiestufe • Kennzahlen: -
--	---

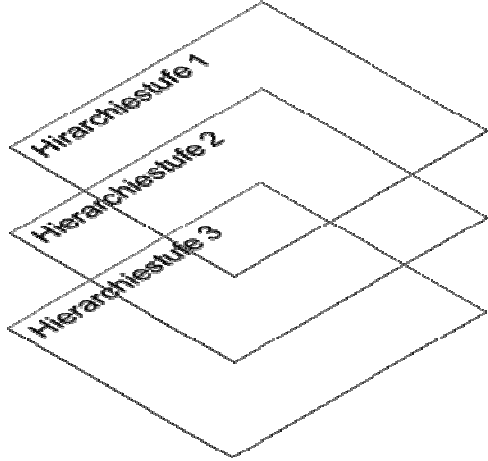
	<p>Anwendungsbereich: Multiprojektarbeit (Auslastungsgrad der Mitarbeiter auf Basis der bearbeiteten Funktionen und Systemelemente und der Aufwand)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Domänenübergreifende Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Darstellung welche Produktelemente (Funktionen, Systemelemente) ein Mitarbeiter in verschiedenen Projekten verantwortet • Domäneninterne Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Schnittstellen der verantworteten Produktelemente in einem spezifischen Projekt
---	--

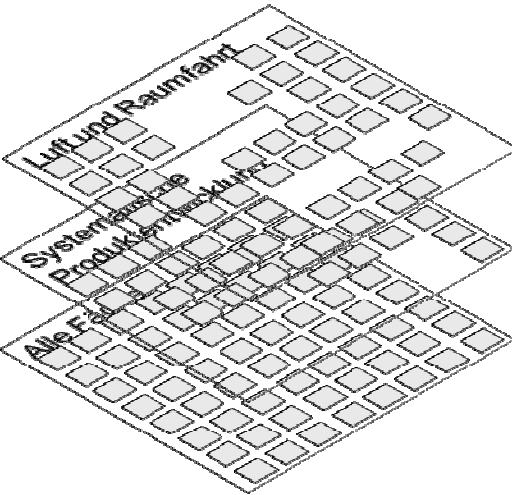


Sonstiges:

	<p>Anwendungsbereich: Absicherungsplanung: Welche Bereiche Produktelemente (Systemelemente, Funktionen) werden in welchen Versuchen abgeprüft – Analyse der Absicherungsabdeckung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Domänenübergreifende Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Kann entfallen • Zeigt ansonsten die Schnittstellen der Produktelemente (Funktionen, Systemelemente) • Domäneninterne Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Schnittstellen der in einem Versuch abgesicherten Produktelemente (Funktionen, Systemelemente) • Kennzahlen: <ul style="list-style-type: none"> • Durch Versuch ermittelte Reifegrade
--	---

	<p>Anwendungsbereich: Variantenmanagement: Darstellung des Kernsystems und möglicher Varianten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Domänenübergreifende Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • zwischen Kernsystem und Add Ons: Mögliche Erweiterungen zu einem Kernsystem • zwischen verschiedenen Add Ons: Kombinationen die sich ausschließen • Domäneninterne Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Abhängigkeiten auf Grund von Schnittstellen • Kennzahlen: <ul style="list-style-type: none"> • Variantenzahlen • Kosten • Stückzahlen (Bestellhäufigkeit) • ... <p>Anmerkungen:</p>
---	--

	<p>Anwendungsbereich: Abstraktions- bzw. Hierarchiestufen (z.B. Baustruktur, Funktionshierarchie)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Domänenübergreifende Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Z.B. aus Bauteilsicht: Gehört zu Modul, Gehört zu System • Aber auch Darstellung von Vernetzung über Systemgrenze • Domäneninterne Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • Abhängigkeiten auf Grund von Schnittstellen • Kennzahlen: -
---	--

	<p>Anwendungsbereich: Studiengangwahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Domänenübergreifende Vernetzung: <ul style="list-style-type: none"> • In der untersten Ebene werden alle Fächer gerastert aufgeführt • Bei einer Sicht von oben kann man für zwei Studiengänge vergleichen, in welchen Fächern sich diese überschneiden • Kennzahlen: <ul style="list-style-type: none"> • Häufigkeit eines Faches in über alle Studiengänge • Wahlhäufigkeit • Notendurchschnitt • Semesterwochenstundenzahl • ...
---	---

12.3 Glossar

3D / 2D	<i>dreidimensional / zweidimensional</i>
CA	<i>Comfort Access</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAX	<i>Gruppe der Computer Aided – Systeme</i>
DSM	<i>Design Structure Matrix</i>
DMM	<i>Domain Mapping Matrix</i>
EDM	<i>Engineering Data Management</i>
EMV	<i>Elektromagnetische Verträglichkeit</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FZD	<i>Funktionszentrum Dach</i>
ID	<i>Identification</i>
MDM	<i>Multiple-Domain Matrix</i>
PDM	<i>Product Data Management</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
SHD	<i>Schiebehebedach</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>
XML	<i>Exstensible Markup Language</i>

13 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 und
- 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 Optimierungsverfahren 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 KITSTEINER, 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 Kraffteinleitungsstellenkonstruktion 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.:
Anforderungsklä rung 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.
TU München, 2009. (als Dissertation eingereicht)
- D105 DIEHL, H.:
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer
Automobilsysteme.
Zugl. München: TU, Diss. 2009.

