

Lehrstuhl für Produktentwicklung
der Technischen Universität München

Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte

Stefanie Constanze Zirkler

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. Hartmut Hoffmann

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

Die Dissertation wurde am 28.12.2009 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 28.04.2010 angenommen.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Problemstellung

Durch die Integration unterschiedlicher technischer Disziplinen bietet sich bei der Entwicklung mechatronischer Produkte ein deutlich breiterer Lösungsraum als im klassischen Maschinenwesen. Daraus ergeben sich einerseits zahlreiche Potenziale der Funktionserweiterung und der Produktoptimierung, andererseits aber auch neue Herausforderungen in Bezug auf das Kostenmanagement. Diesem kommt zudem nicht nur in wirtschaftlich schwierigen Zeiten, in denen der Kostendruck für die Unternehmen allgegenwärtig ist, eine immer entscheidendere Rolle zu. Um wettbewerbsfähige Produkte entwickeln zu können, müssen Entwicklerteams aus unterschiedlichen Disziplinen bereits in den frühen Phasen der Entwicklung in der Lage sein, die Kosten ihrer Produkte zu analysieren und zu optimieren.

Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund ist es das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit, Disziplinübergreifende Entwicklerteams in der frühen Phase der Entwicklung bei der kostenorientierten Konzeptfindung und -entscheidung zu unterstützen. Die Unterstützung konzentriert sich dabei auf eine durchgängige Handhabung der relevanten Produkt- und Kostendaten, die Bereitstellung geeigneter Kostenschätzmethoden und die Identifikation von Handlungsanstößen zu kostenorientierten Konzeptoptimierungen.

Ergebnisse

Auf Basis von umfangreichen Untersuchungen in der Praxis wurden die Anforderungen an eine methodische Unterstützung eines transdisziplinären Zielkostenmanagements gesammelt und ein generischer Zielkostenmanagementleitfaden entwickelt. Zur Unterstützung der Entwickler werden für die einzelnen Schritte des Leitfadens Hilfsmittel der Informationshandhabung, Kostenanalyse und Kostenoptimierung bereitgestellt. So basiert der Leitfaden auf einem durchgängigen Informationsmodell welches im Laufe der Entwicklung ständig erweitert werden kann. Zur Kostenanalyse stehen fünf Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation bereit welche auf Basis zahlreicher disziplinspezifischer Methoden entwickelt wurden. Im Rahmen der Kostenoptimierung werden im Gegensatz zu bestehenden Ansätzen primär strukturelle Charakteristika des Lösungskonzeptes heran gezogen, so dass eine Optimierung des Gesamtkonzeptes und nicht nur einzelner Gestaltausprägungen ermöglicht wird.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen zum einen auf, von welcher großer Bedeutung die enge Zusammenarbeit der unterschiedlichen Disziplinen nicht nur bei der eigentlichen Entwicklungsarbeit sondern insbesondere auch beim Kostenmanagement der zu entwickelnden Produkte ist. Es wird gezeigt auf welche Weise diese Zusammenarbeit unterstützt werden kann und es werden Hilfsmittel aufgezeigt, die allen Disziplinen zugänglich sind und somit potenziell auch in der industriellen Praxis vermehrte Akzeptanz finden können.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

Die vorliegende Arbeit erweitert das klassische Kostenmanagement technischer Produkte um die Berücksichtigung von Strukturmerkmalen, die ursprünglich aus der Graphentheorie bekannt sind, und nutzt diese zur kostenorientierten Analyse und Optimierung unterschiedlicher Ausprägungen der Produktstruktur. Es wird deutlich, welches bisher unerkannte Potenzial diese neue Herangehensweise birgt. Abschließend wird aufgezeigt, in welcher Weise Folgearbeiten auf den erarbeiteten Ergebnissen aufbauen können.

Garching, im Juni 2010

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München von Mai 2005 bis Januar 2010.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann für die Unterstützung und das in mich gesetzte Vertrauen. Die mir entgegengebrachte, stets konstruktive Kritik gepaart mit der Gewährleistung gestalterischer Freiheit bildete die Grundlage für das Gelingen meiner Dissertation.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier vom Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn danke ich für die Übernahme der Zweitberichterstattung. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und die damit einhergehende organisatorische Abwicklung der Dissertation danke ich Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann vom Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Das Kostenmanagement mechatronischer Produkte bildete den Schwerpunkt meiner Forschungstätigkeit am Lehrstuhl. Dabei eröffnete mir die Bearbeitung des von der DFG geförderten Forschungsprojekts „Kostenfrüherkennung mechatronischer Produkte mittels Analyse multiplanarer Vernetzungen“ die Möglichkeit, neue Ansätze zu entwickeln und an Praxisbeispielen zu erproben. Neben den Förderern dieses Projektes gilt mein Dank den Kollegen aus der Wissenschaft und den Mitarbeitern aus der Industrie, mit denen ich meine Ansätze und Ergebnisse diskutieren und damit auch weiterentwickeln konnte.

Ganz besonders möchte ich mich bei all meinen Kollegen am Lehrstuhl für die gute Zusammenarbeit in Projekten, Forschung und Lehre bedanken. Stellvertretend möchte ich meine drei Bürokollegen Andreas Gaag, David Hellenbrand und Wolfgang Lauer erwähnen, die mir alle drei wertvolle Gesprächs- und Diskussionspartner waren. Für ihre Unterstützung bei der Illustration meiner Dissertation möchte ich mich recht herzlich bei unserer Mediengestalterin Eva Körner bedanken.

Ebenso möchte ich den Studenten danken, die mich als Diplomanden, Semestranten und studentische Hilfskräfte bei meiner Arbeit unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich dabei Tobias Henning und Georg Grüneißl.

Ganz herzlich danke ich meinem Mann Andy für die Durchsicht meiner Dissertation und die wertvollen konstruktiven Anmerkungen sowie für seine Geduld und sein Verständnis während den letzten Monaten der Fertigstellung.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern für die große Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung bedanken!

Höhenkirchen, im Juni 2010

Stefanie Zirkler

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Einordnung und thematische Abgrenzung der Arbeit.....	3
1.3	Erfahrungsgrundlage	4
1.4	Aufbau der Arbeit.....	5
2	Kostenmanagement mechatronischer Produkte	7
2.1	Transdisziplinarität und Komplexität mechatronischer Produkte und ihrer Erstellungsprozesse	7
2.2	Konsequenzen für die Gestaltung von Vorgehensmodellen, Methoden und Werkzeugen.....	10
2.2.1	Unterstützung der Produktentwicklung	10
2.2.2	Unterstützung der Prozessentwicklung	11
2.3	Konsequenzen für die Gestaltung des Kostenmanagements.....	12
3	Stand der Forschung und Technik	17
3.1	Grundlagen der Entwicklung mechatronischer Produkte.....	17
3.1.1	Der Systembegriff in der Mechatronik	18
3.1.2	Das Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen in mechatronischen Systemen.....	23
3.1.3	Produktentwicklung in der Mechatronik	26
3.1.4	Der disziplinübergreifende Systementwurf	29
3.1.5	Zusammenfassung und identifizierte Defizite	32
3.2	Grundlagen des Komplexitätsmanagements	33
3.2.1	Matrixbasierte Ansätze zur Modellierung komplexer mechatronischer Systeme.....	37
3.2.2	Analyse und Optimierung komplexer Produkte mittels Kennzahlen und Strukturmerkmalen	43
3.2.3	Zusammenfassung und identifizierte Defizite	49

3.3	Grundlagen des Kostenmanagements in der Produktentwicklung	50
3.3.1	Target Costing	51
3.3.2	Kostenrechnung der entwicklungsbegleitenden Kalkulation im Rahmen des Target Costing	54
3.3.3	Unterstützung der entwicklungsbegleitenden Kalkulation durch Verfahren der Kurzkalkulation.....	58
3.3.4	Methodische Unterstützung des kostengünstigen Konstruierens.....	72
3.3.5	Zusammenfassung und identifizierte Defizite	75
4	Anforderungen an ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement.....	79
4.1	Handlungsschwerpunkte und grundlegende Anforderungen.....	79
4.2	Lastenheft des transdisziplinären Zielkostenmanagements	82
4.2.1	Anforderungen der Informationshandhabung	82
4.2.2	Anforderungen der Kostenanalyse	83
4.2.3	Anforderungen der Kostenoptimierung	83
5	Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement	85
5.1	Strukturen des disziplinübergreifenden Systementwurfs	88
5.2	Grundlegender Aufbau des Leitfadens und Integration der Hilfsmittel	95
5.3	Struktur- und Kostenmodellierung	100
5.4	Methodische Unterstützung der Kostenfrüherkennung	115
5.5	Ableitung von Optimierungsschwerpunkten und -ansätzen	123
6	Evaluierung des transdisziplinären Zielkostenmanagements	131
6.1	Beispielhafte Anwendung des Leitfadens.....	131
6.1.1	Beschreibung des Ausgangsproduktes	131
6.1.2	Anforderungen und resultierende Überarbeitungen.....	133
6.1.3	Klassifizierung der Komponenten mittels kostenwirksamer Strukturmerkmale.....	137
6.1.4	Durchführung der Kostenschätzung.....	139
6.1.5	Interpretation der Kostenschätzung.....	141

6.2	Bewertung des Leitfadeneinsatzes	143
6.2.1	Informationshandhabung	143
6.2.2	Kostenschätzung	144
6.2.3	Kostenoptimierung	145
7	Zusammenfassung	147
7.1	Bearbeitete Aufgabenstellung	147
7.2	Vorgehen und Ergebnisse.....	148
7.3	Ausblick	150
8	Literaturverzeichnis	151
9	Anhang	175
9.1	Nomenklatur der Teilmatrizen	175
9.2	Kompletter Zielkostenmanagement-Leitfaden.....	176
9.3	Bewertung der Übertragbarkeit der disziplinspezifischen Methoden der Kurz kalkulation	193
9.4	Basismethoden der transdisziplinären Kurz kalkulation	197
9.5	Überblick Untersuchungsbasis	202
9.6	Fragebogen der Studie.....	203
10	Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung	207

1 Einleitung

In zunehmend globalisierten Märkten sehen sich die Unternehmen mit einem erhöhten Preisdruck konfrontiert, dem sie nur begegnen können, indem sie ihre eigenen Kosten möglichst gering halten. Doch nicht nur die Märkte verändern sich. Seit Jahren hält die Mechatronik Einzug in die Produkte des klassischen Maschinenbaus und eröffnet damit die Möglichkeit zur Verbesserung aber auch Erweiterung der Funktionalität bestehender Systeme.

So verfügen unsere Automobile inzwischen über aufwändige Sicherheitssysteme, die unter anderem in der Lage sind den Sicherheitsabstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug konstant zu halten. Anhand dieses Beispiels erfolgt in diesem einleitenden Kapitel die Darlegung der behandelten Problemstellung und die Detaillierung der übergeordneten Zielsetzung das Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte durch geeignete Methoden zu unterstützen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Mechatronik ermöglicht eine Verbesserung und oft sogar eine Erweiterung der Funktionalität bestehender Produkte des klassischen Maschinenbaus durch die Integration neuer Prinziplösungen weiterer technischer Disziplinen. In der Folge sehen sich Entwickler mechatronischer Produkte einem stark erweiterten Lösungsraum gegenüber, aus dem sie geeignete Wirkprinzipien auswählen und kombinieren müssen. Auf diese Weise entstehen bereits in der frühen Phase der Entwicklung zahlreiche Produktkonzeptvarianten unterschiedlicher Partitionierung. Bevor eine dieser Konzeptvarianten zur weiteren Konkretisierung ausgewählt werden kann, müssen die konkurrierenden Konzepte auch hinsichtlich ihrer zu erwartenden Kosten bewertet werden. Dies fällt jedoch den Entwicklern aufgrund mangelnden Wissens über die Kostenentstehung, fehlender Kostentransparenz und fehlender methodischer Unterstützung der Kostenfrüherkennung mechatronischer Produkte schwer. In der Folge treten in späteren Phasen der Entwicklung nicht selten immense Zielkostenüberschreitungen zu Tage, die den gesamten Produkterfolg gefährden. Es reicht jedoch nicht alleine die Kostenbewertung zu unterstützen. Entscheidend ist es, Grundsätze des kostengünstigen Konstruierens bereits von Beginn der Entwicklung einzusetzen und auf Basis von entwicklungsbegleitenden Kostenbewertungen weitere Kostenoptimierungen zu realisieren. Doch auch hierfür findet der Entwickler mechatronischer Produkte nur wenig Unterstützung.

Zur Veranschaulichung der umrissenen Problemstellung wird das Beispiel des eingangs erwähnten Sicherheitssystems zur Abstandsregelung aufgegriffen. Bei einem solchen, so genannten Adaptive Cruise Control (ACC), wird die Position und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs mit einem Sensor ermittelt und die Geschwindigkeit sowie der Abstand des mit diesem System ausgerüsteten nachfolgenden Fahrzeugs entsprechend durch Motor- und Bremseingriff geregelt. Kommt es während der Fahrt zu einem Einnicken bzw. Einfedern des Fahrzeugs, kann ohne Nachführung des Lidar-Sensors nicht gewährleistet werden, dass dieser die vorausfahrenden Fahrzeuge erfasst. Um diese dynamische Veränderung der Fahrzeuglage auszugleichen sind viele Lösungen denkbar. So sind in Bild 1-1 schematisch fünf Konzepte abgebildet, die alle samt eine Nachführung des Lidar-Sensors ermöglichen und dabei auf unterschiedliche Wirkprinzipien zurück greifen.

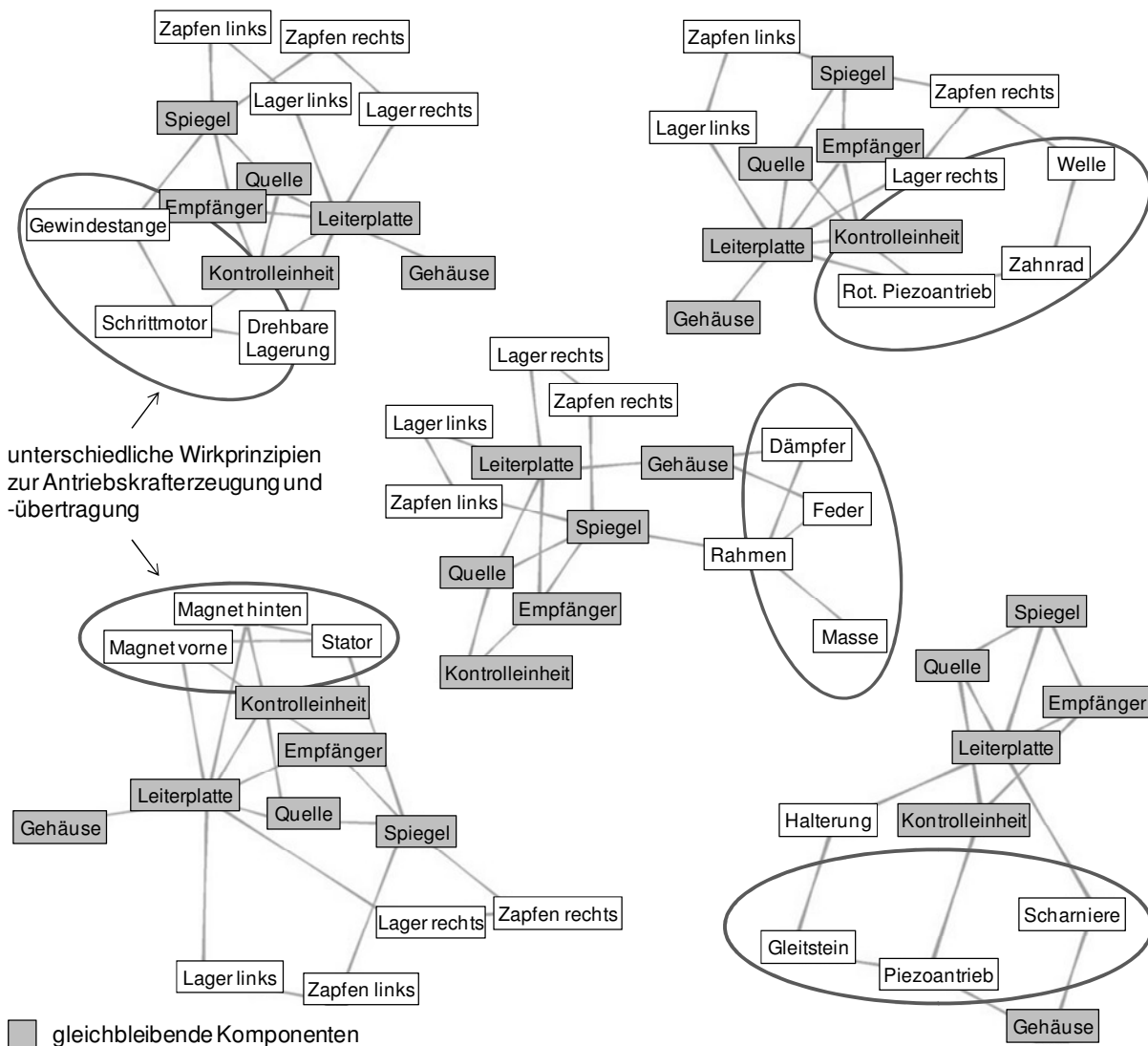


Bild 1-1: Konzeptalternativen einer dynamischen Lidarnachführung

Bei den abgebildeten Konzepten fällt auf, dass obwohl sie alle die gleiche Funktionalität erfüllen, sie alle eine unterschiedliche Struktur und damit auch Komplexität aufweisen. Doch welches der Konzepte verursacht bei seiner Umsetzung die geringsten Kosten? Das mit den wenigsten Elementen? Das mit den wenigsten Relationen? Und wo liegen die Kostentreiber der einzelnen Konzepte? Welche Möglichkeiten gibt es die einzelnen Konzepte aus Kostensicht zu optimieren? All dies sind Fragen, die ein Entwicklerteam bereits in frühen Phasen der Entwicklung auf Basis sehr geringer Informationen beantworten muss.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es Entwicklern mechatronischer Produkte die Beantwortung dieser und weiterer Fragen zu erleichtern und so die Phase der Konzeptfindung und -entscheidung unter Kostengesichtspunkten entscheidend zu unterstützen. Eine frühzeitige, aussagekräftige Kostenplanung, -kontrolle und -steuerung soll dabei durch einen mit Methoden und Hilfsmitteln hinterlegten Leitfaden realisiert werden.

1.2 Einordnung und thematische Abgrenzung der Arbeit

Der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Leitfaden und seine integrierten Methoden und Hilfsmittel wurden für den entwicklungsbegleitenden Einsatz während den frühen Phasen der Produktentwicklung konzipiert. Im Hinblick auf die Entwicklung mechatronischer Produkte betrifft dies die Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs. Der Fokus liegt auf der Analyse und Optimierung von direkten und indirekten Fertigungskosten. Entwicklungskosten werden nur am Rande behandelt. Die entwickelten Maßnahmen zur Kostenoptimierung zielen auf eine Produktkonzeptoptimierung ab. Prozessoptimierungen, die sinnvoll erst in späteren Phasen erfolgen können, werden nicht berücksichtigt. Die methodische Grundlage bildet das Target Costing, welches im deutschsprachigen Raum auch als Zielkostenmanagement bezeichnet wird. Die gesammelten Erkenntnisse sind primär anwendbar auf Anpassungskonstruktionen, die sich ausgehend von der Grundstruktur eines Produktes mit der Verbesserung und Erweiterung seiner Funktionalität oder der Entwicklung von (kostengünstigeren) Lösungsalternativen befassen (Bild 1-2).

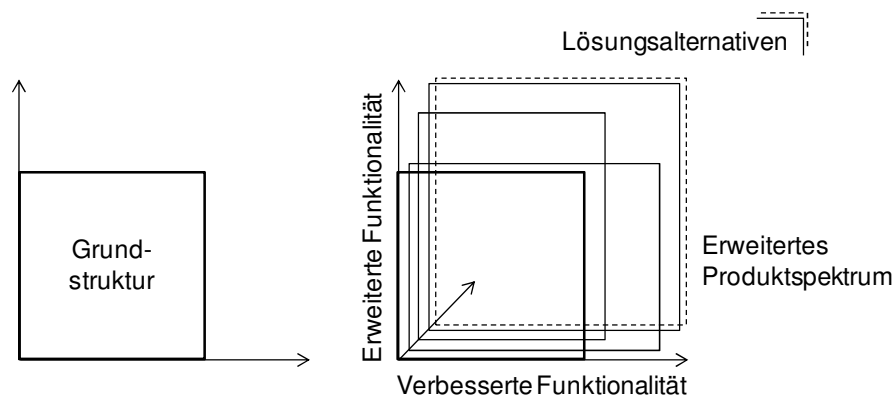


Bild 1-2: Unterstützte Entwicklungsprojekte

Aus wissenschaftlicher Sicht ist die vorliegende Arbeit drei sich überlappenden Themengebieten zuzuordnen (Bild 1-3). Im Vordergrund steht dabei das *Kostenmanagement* technischer Produkte und hier insbesondere das *Zielkostenmanagement* welches die *entwicklungsbegleitende Kalkulation* sowie das *kostengünstige Konstruieren* umfasst. Erweitert wird das Zielkostenmanagement um Punkte der *Pfadkostenrechnung*, einer speziellen Ausprägung der Prozesskostenrechnung.

Das Zielkostenmanagement wird integriert in den *Entwicklungsprozess mechatronischer Produkte*. Der Fokus liegt dabei auf der *frühen Phase* des *disziplinübergreifenden Systementwurfs*. Hier stellt der monetäre Vergleich von Konzeptvarianten unterschiedlicher *Partitionierung* eine besondere Herausforderung dar.

Unterschiedliche Partitionierung bedeutet auch unterschiedliche Ausprägung der Produktstruktur und damit unterschiedliche Komplexität. Die Bewertung des Einflusses der Produktkomplexität auf die Produktkosten mittels Methoden des *Komplexitätsmanagements* ist ein zentraler Punkt der vorliegenden Arbeit. Berücksichtigt werden dabei Methoden der *Strukturmodellierung*, der *Strukturanalyse* sowie der *Strukturoptimierung*.

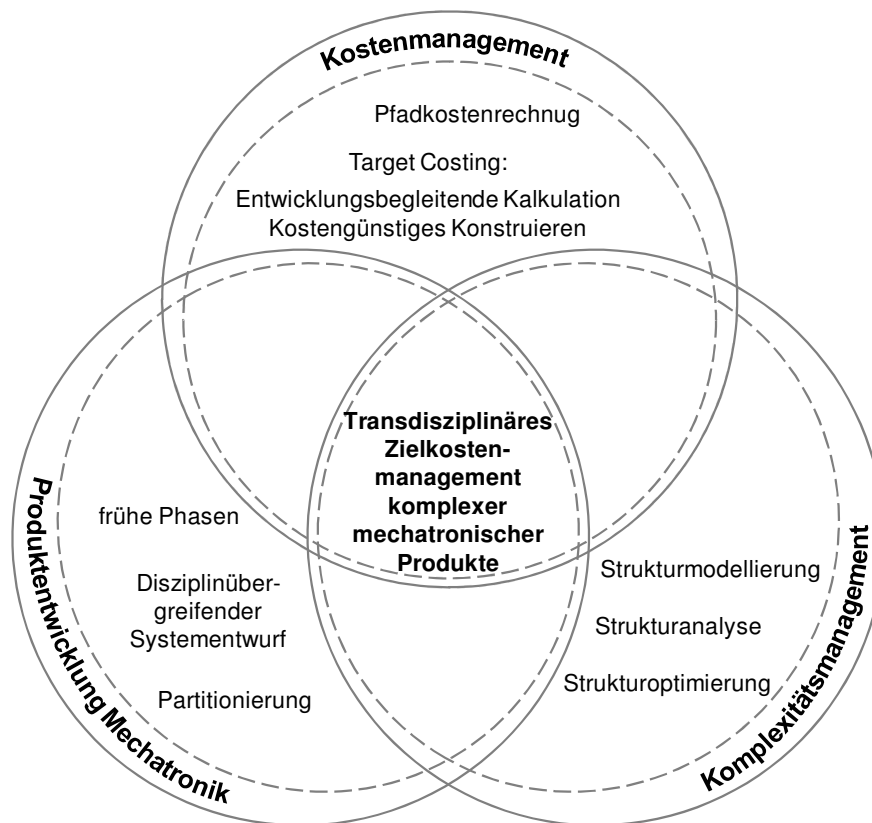


Bild 1-3: Abgrenzung des Themengebietes

1.3 Erfahrungsgrundlage

Die Grundlage dieser Arbeit in Bezug auf die entwickelte Methodik und das zugrunde gelegte wissenschaftliche Vorgehen bildet neben der Recherche wissenschaftlicher Fachliteratur die persönliche Durchführung von Forschungsprojekten am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München durch die Autorin.

Der Großteil der in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ergebnisse entspringt der Beantragung und anschließenden Bearbeitung des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojektes „Kostenfrüherkennung mechatronischer Produkte mittels Analyse multiplanarer Vernetzungen“¹. Im Rahmen des Projektes bestand durch fragebogenbasierte Untersuchungen, Workshops, Interviews und produktbezogene Untersuchungen ein enger Kontakt zu Partnern der Industrie.

Um weitere Erfahrungen ergänzt wird die vorliegende Arbeit durch die intensive Mitarbeit der Autorin an einem industrienahen Forschungsprojekt im Rahmen der Kooperation CAR@TUM zwischen der Technischen Universität München und der BMW Group. Das Projekt MechaTUM² bestand im Wesentlichen aus zwei eng miteinander verzahnten Teilprojekten. So war es auf der einen Seite das Ziel innovative Konzepte für die Komfort- und Sicher-

¹ Laufzeit des Projektes von Januar 2007 bis Dezember 2009, Förderkennzeichen: LI 699/16

² Laufzeit des Projektes inkl. Vorstudie von Oktober 2005 bis Mai 2009

heitsoptimierung des PKW-Ein- bzw. Ausstiegs zu entwickeln. Auf der anderen Seite wurden auf Basis von Analysen der Serienentwicklungsprozesse bei BMW methodische Ansätze zur Unterstützung interdisziplinärer Entwicklungsprozesse in der Fahrzeugindustrie entwickelt. Erste Ergebnisse auf diesem Gebiet wurden dann auf die Entwicklung des Ein-/Ausstiegssystems übertragen und so evaluiert und weiter verfeinert. Von Seiten der Technischen Universität waren an dem interdisziplinären Forschungsprojekt MechaTUM die Lehrstühle für Ergonomie, Steuerungs- und Regelungstechnik, Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Realzeitcomputersysteme und Produktentwicklung beteiligt.

Weiteren Praxisbezug erhält die vorliegende Arbeit durch die Bearbeitung eines industriellen Kostensenkungsprojektes³ in der Textilmaschinenindustrie. Unter der Moderation der Autorin war es hier zum einen das Ziel, die Kosten der betrachteten Baugruppen erheblich zu senken. Zum anderen wurden dem Unternehmen durch die moderierte Anwendung Methoden und Werkzeuge des kostenorientierten Entwickelns und Konstruierens zum Einsatz in weiteren Projekten an die Hand gegeben.

Neben den Erfahrungen aus der Bearbeitung der genannten Projekte flossen zusätzlich Erkenntnisse aus weiteren Tätigkeiten der Autorin im Rahmen ihrer Lehrstuhlzeit ein. Dazu zählen ihre Dozententätigkeit für das VDI Wissensforum Seminar „Konstruktoren senken Kosten“ und ihre Einbindung in den Arbeitskreis Kostenanalyse der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA). Des Weiteren war sie in die Forschergruppen zu den Themen „Kostenmanagement“ und „Komplexitätsmanagement“ des Lehrstuhls für Produktentwicklung eingebunden was einen regen Austausch mit Experten und Kollegen ermöglichte.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den Schritten der Bearbeitung des zugrundeliegenden DFG-geförderten Forschungsprojektes „Kostenfrüherkennung mechatronischer Produkte mittels Analyse multiplanarer Vernetzungen“. Das Vorgehen im Rahmen der Projektbearbeitung wiederum folgte dem Vorgehen der „Design Research Methodology“ (DRM) [BLESSING & CHAKRABARTI 2002]. Die DRM hat zum Ziel die wissenschaftliche Vorgehensweise bei Forschungsarbeiten in der Produktentwicklung zu unterstützen. In diesem Ansatz folgt auf die **Kriteriensuche**, in der das Forschungsziel und der Fokus des Projektes festgelegt werden, eine **erste deskriptive Studie**, die ein vertieftes Verständnis der Problemstellung, die Identifizierung von Einflussfaktoren und die Basis für eigene Ansätze beinhaltet. Anschließend erfolgt eine **präskriptive Studie**, während der eigene Lösungsansätze entwickelt werden, und eine **zweite deskriptive Studie**, in der die entwickelten Lösungsansätze auf ihre erfolgreiche Anwendung hin untersucht werden.

So wurde zunächst zu Beginn des Projektes eine **fragebogenbasierte Studie mit abschließendem Ergebnisworkshop** durchgeführt um die Situation des Kostenmanagements in der Mechatronik zu erfassen und daraus den Handlungsbedarf und die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit abzuleiten. Die grundlegenden Erkenntnisse dieser Phase finden sich in Kapitel 2 und motivieren somit die Entwicklung des erarbeiteten Ansatzes (s. Bild 1-4).

³ Laufzeit des Projektes von März 2008 bis Dezember 2008

Vor der eigentlichen Entwicklung des Ansatzes zur Unterstützung eines transdisziplinären Zielkostenmanagements stand die **Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung und Technik**. Da der Ansatz in der Schnittstelle zwischen den Forschungsbereichen „Kostenmanagement in der Produktentwicklung“, „Entwicklungsmethodik der Mechatronik“ und „Komplexitätsmanagement“ angesiedelt ist, teilt sich Kapitel 3 entsprechend in drei Unterkapitel.

Auf Basis der fragebogenbasierten Studie und der Erfassung des Standes der Technik erfolgte die Ableitung von Anforderungen an die Unterstützung eines transdisziplinären Zielkostenmanagements, die in Kapitel 4 zusammengefasst sind.

Den Kern der vorliegenden Arbeit bildeten die **Entwicklung des generischen Zielkostenmanagement Leitfadens und der ihm hinterlegten Methoden und Hilfsmittel**. Kapitel 5 beschreibt sowohl den Aufbau des Leitfadens als auch die in drei Kategorien gegliederten Methoden und Werkzeuge, die im Rahmen des Leitfadeneinsatzes zur Anwendung kommen können.

Zu Ende der Projektbearbeitung erfolgte die **Evaluierung des entwickelten Ansatzes** durch seine Anwendung auf ein der Praxis entliehenes Beispiel und durch Diskussion der Ergebnisse mit Experten aus Wissenschaft und Praxis. Die Resultate dieser Projektphase sind in Kapitel 6 festgehalten.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der vorangehenden Kapitel und dem Ausblick auf mögliche, nachfolgende Forschungsarbeiten in Kapitel 7.

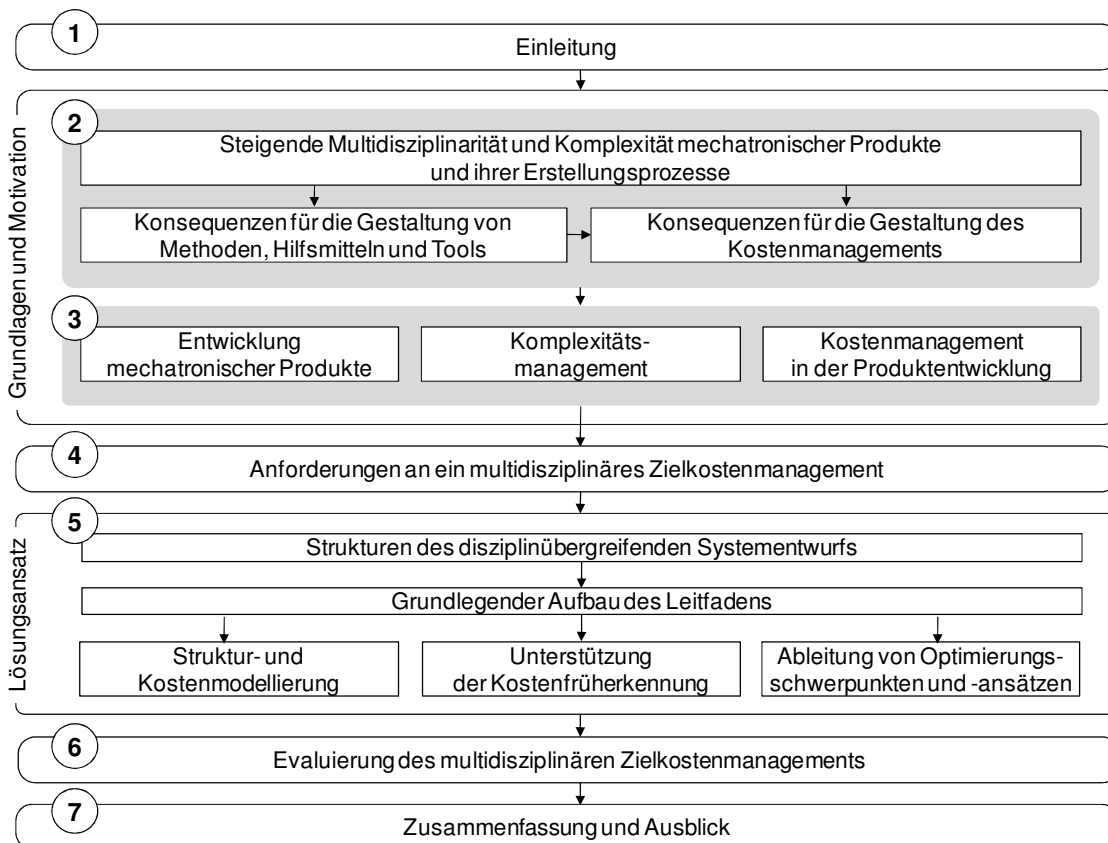


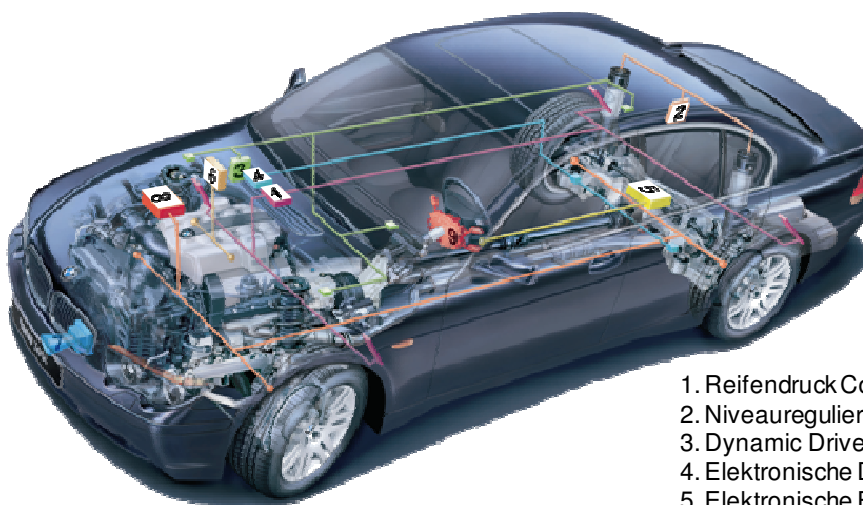
Bild 1-4: Aufbau der Arbeit

2 Kostenmanagement mechatronischer Produkte

Dieses Kapitel beschreibt den kontinuierlichen Einzug der Mechatronik in die klassischen Erzeugnisse des Maschinenbaus und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Gestaltung von Methoden und Werkzeugen. Vor diesem Hintergrund wird der aktuelle Stand des Kostenmanagements in den Unternehmen beleuchtet und verdeutlicht, wie wenig der Trend der Transdisziplinierung in diesem wichtigen Teilbereich der Produktentwicklung bisher verankert ist.

2.1 Transdisziplinarität und Komplexität mechatronischer Produkte und ihrer Erstellungsprozesse

Mit dem VW 1600 brach in den 1970ern in der Automobilindustrie eine neue Ära an. Mit der Realisierung der ersten elektrischen Kraftstoffeinspritzung begann die Elektrifizierung des PKW. Von diesem Zeitpunkt an bis heute – und wohl auch für die absehbare Zukunft – lässt sich beobachten, dass die meisten Innovationen der Automobilindustrie auf dem Einsatz von Elektronik beruhen. Einige Quellen führen bis zu 90 % der Innovationen der Automobilindustrie auf diesen Trend zurück [DAIS 2004, GROMER 2004]. Der Großteil der Innovationen betrifft nicht reine Elektronik-Funktionen, sondern Automatisierungs- und Regelungsfunktionen für die mechanischen Komponenten im Kraftfahrzeug. In den drei wesentlichen mechanischen Subsystemen im Fahrzeug, nämlich dem Fahrwerk, dem Antriebsstrang und dem Innenraum, werden die mechanischen Systeme immer mehr von Elektronik überwacht, gesteuert, geregelt und in Zukunft eventuell sogar mehr oder weniger autonom betrieben. Die anfangs nur zusätzlich eingebrachte Elektronik ist inzwischen auf dem Wege, ein vollständig integrierter Bestandteil des ursprünglich rein mechanischen Systems zu werden [SCHÖNER 2006, S.9] (Bild 2-1).



1. Reifendruck Control
2. Niveauregulierung mit Luftfederung
3. Dynamic Drive
4. Elektronische Dämpfer Control
5. Elektronische Feststellbremse
6. Digitale Motor Elektronik
7. Active Cruise Control
8. Dynamische Stabilitäts Control
9. Schaltzentrum Lenkrad

Bild 2-1: Mechatronik in der Fahrzeugtechnik (Bild mit freundlicher Genehmigung der BMW Group)

Diese Integration von mechanischen, elektrischen und softwaretechnischen Komponenten wird weitläufig als **Mechatronik** bezeichnet (Grundlagen der Mechatronik – Kapitel 3.1). Die hohe Innovationsfähigkeit mechatronischer Systeme beruht dabei auf ihren zahlreichen technischen als auch wirtschaftlichen Potenzialen, die von FELGEN [2007, S.44] wie folgt zusammengefasst werden:

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

Die verstärkte Integration unterschiedlicher Disziplinen verlangt zunehmend nach einer transdisziplinären Arbeitsweise bei der Erstellung mechatronischer Produkte. Transdisziplinarität beschreibt dabei eine deutlich stärkere Zusammenarbeit der Disziplinen als die Multidisziplinarität oder die Interdisziplinarität (s. Bild 2-2). Dies betrifft insbesondere den Methodeneinsatz im Rahmen der gemeinsamen Aufgabenbearbeitung.

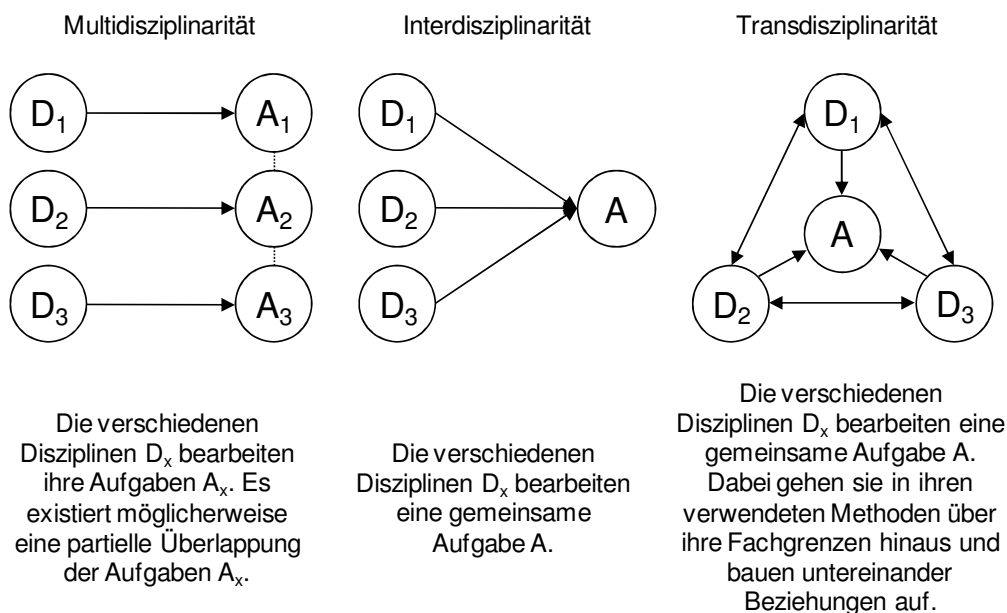


Bild 2-2: Unterschiede zwischen Multidisziplinarität, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität [nach BRAND 2004, S.52F]

Unter **Multidisziplinarität** versteht man die nebenläufige Bearbeitung einer Aufgabenstellung durch voneinander unabhängige Fachbereiche, wobei zwischen den Disziplinen kein nennenswerter methodischer, terminologischer oder konzeptioneller Austausch stattfindet. Eine Synthese erfolgt lediglich additiv, durch Zusammenführung der jeweils getrennt erziel-

ten Ergebnisse. Im Gegensatz zur Multidisziplinarität zeichnet sich die **Interdisziplinarität** dadurch aus, dass die getrennten, also nicht notwendigerweise miteinander in Beziehung stehenden oder sich vom verwendeten Methodenspektrum her überlappenden Disziplinen einer gemeinsamen Aufgabe zuwenden und diese bearbeiten. Darüber hinaus beschreibt die **Transdisziplinarität** das in Beziehung treten verschiedener Disziplinen die sich dabei über ihre Grenzen hinaus auf einander zu bewegen [BRAND 2004, S.50FF].

Die Notwendigkeit des trans- oder doch zumindest interdisziplinären Zusammenarbeitens wird neben anderem als ein Merkmal der Komplexität mechatronischer Produkte bzw. ihrer Erstellungsprozesse angesehen. Im Rahmen der Studie „Kostentransparenz in der Mechatronik“ nannten die Befragten noch zahlreiche weitere Merkmale der **Produktkomplexität**, die sich im weitesten Sinne auf die steigenden und sich zeitlich häufig verändernden Anforderungen, eine große Anzahl von Funktionen und Teilen, sowie einer Vielzahl von Abhängigkeiten und Schnittstellen beziehen [BRAUN ET AL. 2007, S.19FF]. Auch in der Wissenschaft findet sich bisher keine allgemein gültige und anerkannte Definition von Komplexität (Grundlagen des Komplexitätsmanagements – Kapitel 3.2).

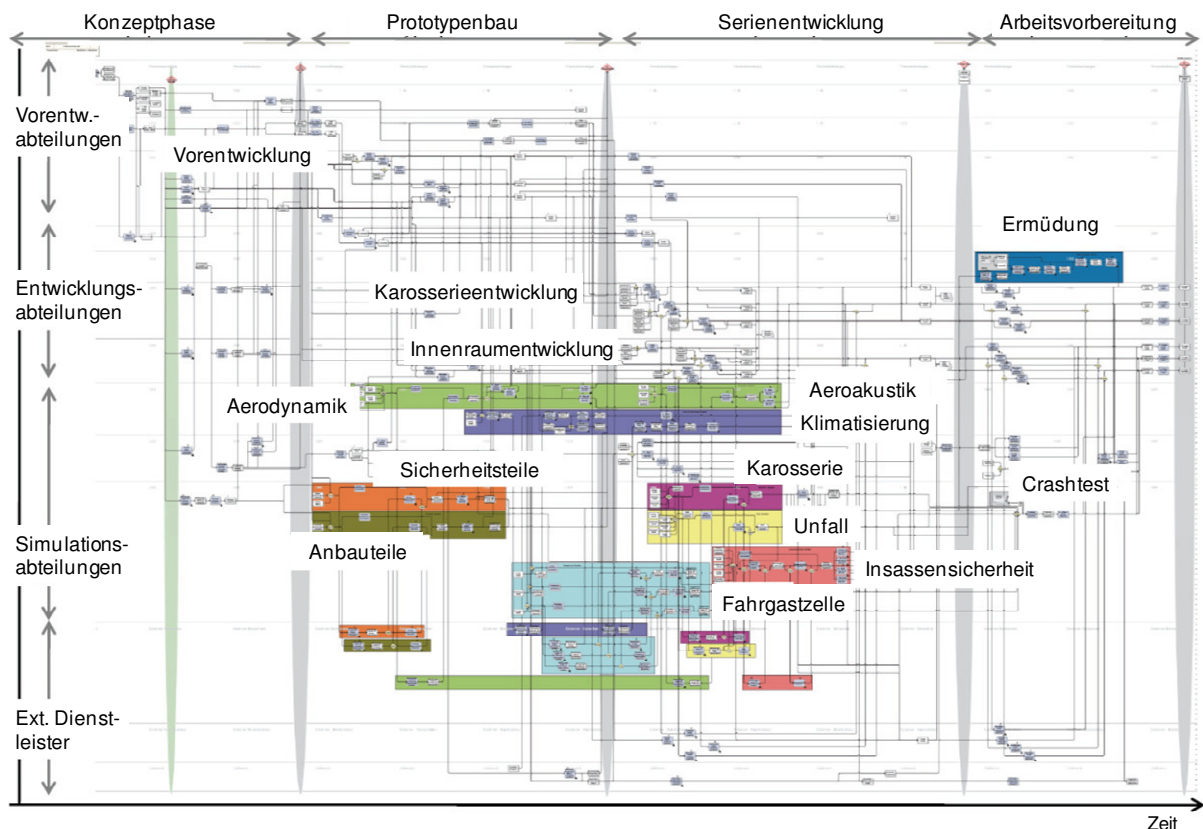


Bild 2-3: Beispiel eines komplexen Produkterstellungsprozesses in der Automobilindustrie [KREIMEYER 2010]

Folge einer erhöhten Produktkomplexität ist eine erhöhte **Prozesskomplexität** in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses [BRAUN ET AL. 2007, S.23FF]. Durch die hohe Anzahl, der an der Erstellung mechatronischer Systeme beteiligten Disziplinen, zusammen mit einem kon-

tinuierlich steigenden Zeitdruck und der starken Parallelisierung von Abläufen (vgl. Bild 2-3), gestalten sich die Organisation und die Kommunikationsflüsse zunehmend komplexer [vgl. z. B. EVERSHEIM & SCHUH 2005, S.22FF; MAIER ET AL. 2006; WARKETIN & HERBST 2007].

2.2 Konsequenzen für die Gestaltung von Vorgehensmodellen, Methoden und Werkzeugen

Als Reaktion auf den konsequenten Einzug der Mechatronik in die klassischen Erzeugnisse des Maschinenwesens entwickelten sich in den letzten Jahren zahlreiche Vorgehensmodelle, Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Entwicklung komplexer Produkte und zur Beherrschung komplexer Prozesse.

2.2.1 Unterstützung der Produktentwicklung

Orientiert man sich an der VDI-Richtlinie 2221, so kann man die aktuell entstehenden Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Produktentwicklung in der Mechatronik kategorisieren und in das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren einordnen (Bild 2-4). Natürlich existieren neben den aufgeführten noch weitere Arbeiten, die jedoch für die vorliegende Arbeit nicht weiter relevant sind, da es an dieser Stelle lediglich die Absicht der Autorin ist, aufzuzeigen, wie breit das Spektrum der Arbeiten auf dem Gebiet der Entwicklung mechatronischer Produkte bereits ist.

Zur Unterstützung der besonders frühen Phasen gehören dabei die Arbeiten auf dem Gebiet des **Anforderungsmanagements** [z. B. REIB UND SCHULLER 2009], der **Partitionierung** [z. B. JANSEN 2007] und der **disziplinübergreifenden Modellierung** [z. B. GAUSEMEIER ET AL. 2009A]. So stellt die Partitionierung die Aufteilung der Erfüllung der funktionalen Anforderungen auf die einzelnen Disziplinen dar. Ergebnis sind prinzipielle Lösungsalternativen, die es mit Hilfe geeigneter Modellierungstechniken aufzubereiten gilt. Die disziplinübergreifenden Modelle werden in späteren Phasen mittels **disziplinspezifischer Modellbildungstechniken** detailliert [z. B. ISERMANN 2007, S.47FF]. In die Produktentwicklung integrierte Ansätze der **Systemtechnik** unterstützen diesen Hierarchisierungsprozess [PATZACK 1982; BRUNS 1991]. Weiterführende Arbeiten auf dem Gebiet des **Komplexitätsmanagements** bieten eine Hilfestellung bei der Gestaltung der Produktstruktur, indem sie Analyse- und Synthesemethoden bereitstellen [z. B. MAURER 2007]. Weitere Methoden, die auf eine, unter bestimmten Gesichtspunkten optimierte, Produktstruktur abzielen finden sich im Bereich der **Modularisierung** [z. B. BALDWIN & CLARK 2000; GAUSEMEIER ET AL. 2009B] und des **Variantenmanagements** mechatronischer Produkte [SCHUH & SCHWENK 2001; BRAUN & DEUBZER 2007]. Zu erwähnen sind an dieser Stelle auch die zahlreichen Bestrebungen zur **Automatisierung des Entwurfsprozesses** [z. B. CAMPBELL 2007, ALBERS ET AL. 2009]. Auf Basis der grundlegenden Produktstruktur, also der prinzipiellen Lösung, erfolgt zunächst eine **multikriterielle Bewertung** der zur Auswahl stehenden Lösungsalternativen [z. B. WARTZACK 2001] und im Anschluss die Ausgestaltung des ausgewählten Konzeptes. Diese wird unterstützt durch **Entwurfsrichtlinien** und **Standardisierungsbestrebungen** besonders im Bereich von Datenaustauschnittstellen. Die in dieser Phase des Entwicklungsprozesses

entstehenden und bereits erwähnten disziplinspezifischen Produktmodelle bilden die Basis für **virtuelle Funktionstests** [z. B. BENDER ET AL. 2005, S.58FF] wie beispielsweise **disziplinspezifische oder interdisziplinäre Simulationen** (auch **Co-Simulationen** [z. B. SEIFFERT & RAINER 2008, S.149FF]) und **Virtual Prototyping** [z. B. CHOI UND CHAN 2004] in früheren Phasen oder Software- bzw. Hardware-in-the-Loop (**SIL** bzw. **HIL**) Simulationen in späteren Phasen der Entwicklung [z. B. BENDER ET AL. 2005, S.370, 380]. Auf Basis von Simulationen können multikriterielle **Optimierungen** des Entwurfs erfolgen [z. B. SEIFFERT & RAINER 2008, S.38F]. Die Ergebnisse des gesamten, dargelegten Entwicklungsprozesses werden mittels für die Belange der Mechatronik gestalteter **Produktdatenmanagement-Systeme** (PDM-Systeme) begleitend dokumentiert [DETTMERING 2008].

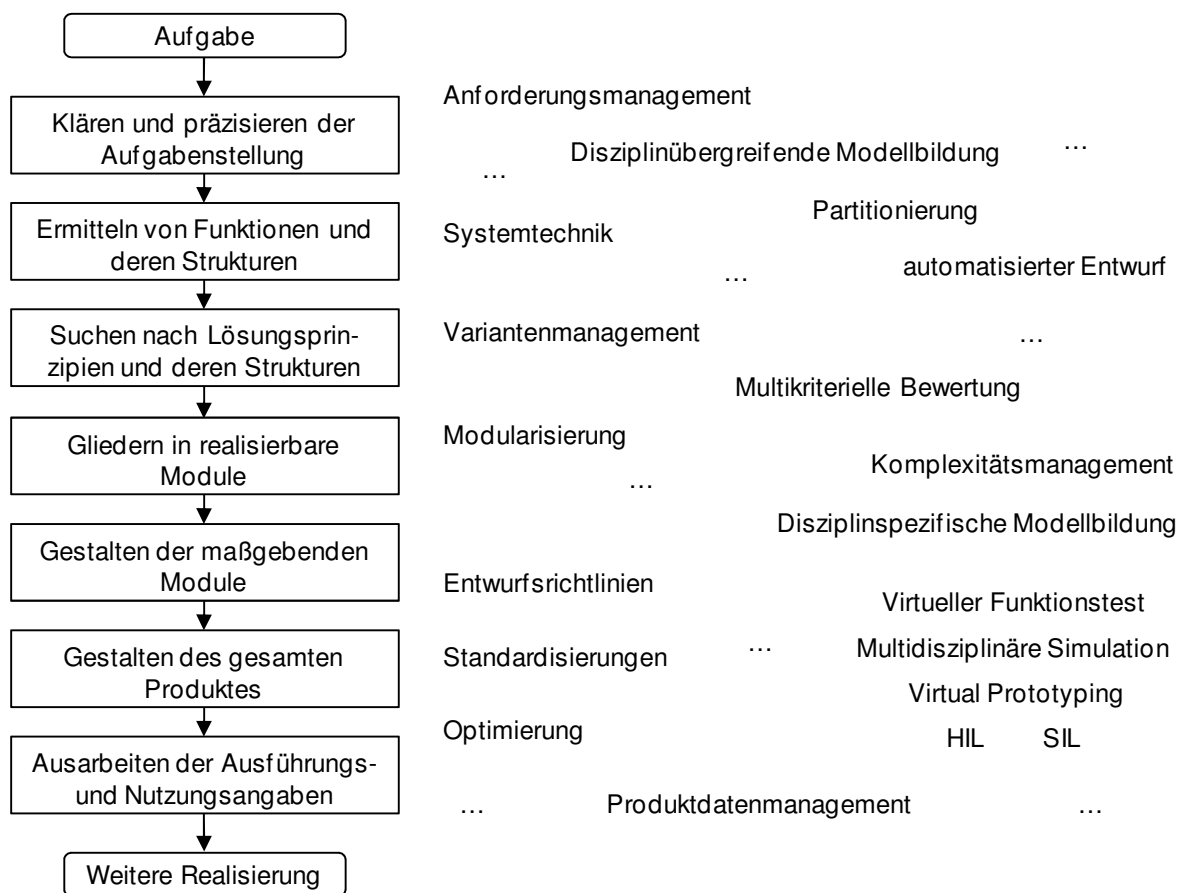


Bild 2-4: Methodische Unterstützung der Entwicklung mechatronischer Produkte

2.2.2 Unterstützung der Prozessentwicklung

Ebenso wie zur Unterstützung der Produktentwicklung lassen sich in der aktuellen Forschung auch zahlreiche Arbeiten zur Beherrschung der Prozesskomplexität in der Mechatronik finden.

Basierend auf Grundsätzen des **Systems Engineering** [DAENZER & HUBER 2002] entwickelten sich aus disziplinspezifischen Vorgehensmodellen **disziplinübergreifende Vorgehensmodelle** wie das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 [VDI 2004]. In der Praxis dienen diese Vorgehensmodelle als Leitlinie zur Gestaltung unternehmensspezifischer Entwicklungs- und Produktionsprozesse. Zur Modellierung interdisziplinärer Prozesse stehen inzwischen zahlreiche **Prozessmodellierungsmethoden** zur Verfügung [s. BAUMBERGER 2007, S.299-316; BROWNING 2009]. Neben der Modellierung besteht die Aufgabe des Prozessmanagements darin entworfene Prozesse zu analysieren und anschließend zu optimieren. Einige Methoden und Werkzeuge zur Analyse und Synthese von Prozessen entspringen dabei dem **Komplexitätsmanagement** [z. B. MAURER 2007]. Ganz generell kommen bei der **Prozessanalyse** unterschiedlichste Metriken und Kennzahlen zum Einsatz [z. B. KREIMEYER 2010]. In Verbindung mit der **Prozessoptimierung** steht die **Optimierung der Organisationsstruktur** eines Unternehmens [KUGELER & VIETING 2005]. Zur Implementierung der Erkenntnisse des Prozessmanagements kommen **Workflowmanagementsysteme** zum Einsatz, über die eine Brücke zu den im vorangegangenen Kapitel erwähnten PDM-Systemen geschlagen werden kann [z. B. VAN DER AALST & VAN HEE 2004]. Neben dieser Verbindung existieren (natürlich) auch konkrete Modelle zur **integrierten Entwicklung von Produkt und Prozess** [z. B. GAUSEMEIER ET AL. 2006, S.28FF].

2.3 Konsequenzen für die Gestaltung des Kostenmanagements

Wie in den beiden vorangehenden Teilkapiteln gezeigt, finden die speziellen Belange der Mechatronik bereits in zahlreichen, sehr unterschiedlichen Forschungsarbeiten Berücksichtigung. Durch die zunehmende Transdisziplinarität der mechatronischen Produktentwicklung ergeben sich jedoch auch deutliche Herausforderungen für das Kostenmanagement, welche in bisherigen Arbeiten bisher unberücksichtigt blieben.

Wie bereits dargelegt wurde, weisen sowohl mechatronische Produkte an sich, als auch die zu ihrer Erstellung notwendigen Prozesse eine steigende Verknüpfung der unterschiedlichen Disziplinen auf. Dies zeigt Auswirkungen auf die Kostenanteile der einzelnen Disziplinen an mechatronischen Produkten. So ist hier eine zunehmende Verschiebung der Kosten in Richtung Elektrotechnik und Informationstechnik zu beobachten. Das heißt der prozentuale Kostenanteil der Elektronik und damit auch der Software am mechatronischen Gesamtprodukt nimmt stetig zu [GRÄBLER 2004, S.43; BRAUN ET AL. 2007, S.51F] (Bild 2-5). Die durch den vermehrten Einsatz von Elektronik und Software ermöglichte, steigende Funktionalität eines Nachfolgeproduktes gegenüber seinem Vorgänger wird auf dem Markt erwartet, jedoch selten honoriert. So werden Nachfolgeprodukte trotz gestiegener Funktionalität oft zu niedrigeren Preisen angeboten als ihre Vorgänger. Hieraus, und aus vielen weiteren Faktoren, entsteht ein enormer Kostendruck auf die Unternehmen. Seit Jahren nachweislich besonders unter Druck stehen Systemzulieferer der Automobilindustrie [KINKEL & LAY 2004]. Bereits im Rahmen einer Studie von 1998 [ARNAOUT 2001] wurde festgestellt, dass „... die Aufforderungen von Abnehmerunternehmen, die Kosten weiter zu senken, (...) für Zulieferunternehmen eine häufige Ursache für die Änderungen der Zielkostenvorgaben (ist) ...“. Damals traf diese Aussage für 87,7 % der befragten Unternehmen zu.

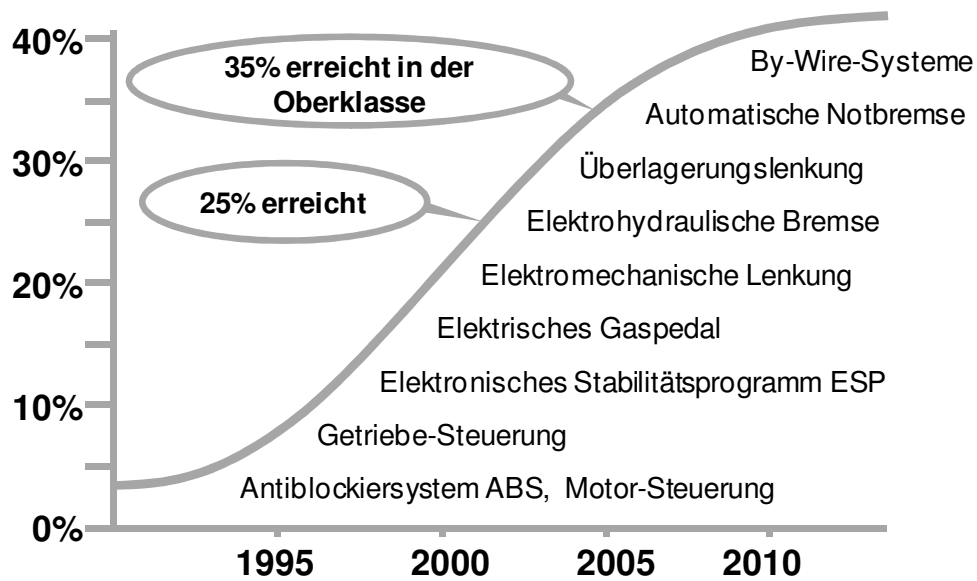


Bild 2-5: Steigender Anteil der Elektronik an den Gesamtkosten eines Fahrzeugs [SCHÖNER 2006, S.9]

In der Folge des Kostendrucks steigt das Kostenbewusstsein in der Entwicklung. Hier verteilt sich die Kostenverantwortung und -verursachung aufgrund der Interdisziplinarität mechatronischer Entwicklungs- und Produktionsprozesse auf eine steigende Anzahl von Bereichen und Abteilungen. Zum einen erschwert dies die Zugänglichkeit von Kosteninformationen, zum anderen erhöhen sich die Entwicklungskosten durch den steigenden Abstimmungsaufwand besonders bei komplexen Produkten [BRAUN ET AL. 2007, S.31FF]. Außerdem wird oft übersehen bzw. unzureichend vermittelt, welche Abhängigkeiten, auch über Bereichs- und Abteilungsgrenzen hinweg, zwischen den Kostentreibern mechatronischer Produkte bestehen, was einen negativen Einfluss auf die Transparenz der Kostenentstehung hat. So ist es nicht verwunderlich, dass über 50 % der Befragten der Studie „Kostentransparenz in der Mechatronik“ die Kostenentstehung ihrer Produkte „nicht problemlos und ohne Einschränkungen“ nachvollziehen können [BRAUN ET AL. 2007, S.41]. Noch schwieriger gestaltet es sich, die Auswirkung von Änderungen an einzelnen Komponenten auf die Kosten des Gesamtproduktes einzuschätzen. Dies setzt zum einen die Kenntnis der Änderungsabhängigkeiten als auch der, diesen hinterlegten, Kosteninformationen voraus.

Die Studie zeigte jedoch auch, dass die Nachvollziehbarkeit der Kostenentstehung durch den Einsatz von Methoden und eine verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit – besonders in frühen Phasen – deutlich verbessert werden kann [BRAUN ET AL. 2007, S.45]. Allerdings nannten nur wenige Unternehmen konkrete Methoden, die sie zur Unterstützung von entwicklungsbegleitenden Kostenschätzungen einsetzen. Grund hierfür ist zum einen, dass der Aufwand zur Einarbeitung in die Methodenanwendung gescheut wird, aber auch dass verfügbare Methoden der beteiligten Disziplinen nicht übergreifend bekannt sind und in der Folge für mechatronische Produkte keine Methodensammlung verfügbar ist, mittels derer die unterschiedlichen Anteile mechatronischer Produkte angemessen kalkuliert werden können. Den Rahmen des entwicklungsbegleitenden Kostenmanagements bildet jedoch in vielen Unter-

nehmen das Target Costing, dessen Verbreitung auch bereits durch andere Studien belegt werden konnte [s. ARNAOUT 2001].

Durch eine Veränderung der Wertschöpfungstiefe von OEMs mechatronischer Produkte steigt der Kostenanteil von Zukaufteilen und somit wächst die Bedeutung des Einkaufs [NIBL 2006]. Für die Entwicklung kann dies jedoch nicht bedeuten die Kostenverantwortung abzuschieben. Vielmehr muss sie in der Lage sein Kosten zugekaufter Baugruppen zu kalkulieren, ohne genaue Kenntnis über Entwicklungs- und Herstellprozesse des Zulieferunternehmens zu haben.

Mit steigender Produktkomplexität gewinnen Posten wie Integrations- und Testkosten an Bedeutung, die im klassischen Maschinenbau eher im Hintergrund standen [BRAUN ET AL. 2007, S.36FF]. Hier wurden sie im Allgemeinen aufgrund ihres doch eher geringen Anteils an den Gesamtkosten nur über pauschale Zuschläge berücksichtigt. Somit ist der Prozessbezug des Kostenmanagements mechatronischer Produkte bisher sehr wenig ausgeprägt.

Die durch die verschiedenen Disziplinen verursachten Kosten unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Art sondern auch in Hinblick auf den Zeitpunkt ihrer Entstehung (Bild 2-6). So ist von der Entwicklung von Anwendungssoftware bekannt, dass hier Personalkosten kontinuierlich von Beginn der Entwicklung an entstehen [BAUMÖL 1999]. Vergleichbar gilt dies auch für die Entwicklung eingebetteter Software mechatronischer Produkte. Die Hardwareentwicklung hingegen, egal ob mechanischer oder elektrotechnischer Art, verursacht schwerpunktmäßig Material- und Fertigungskosten erst in den späten Entstehungsphasen [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.11].

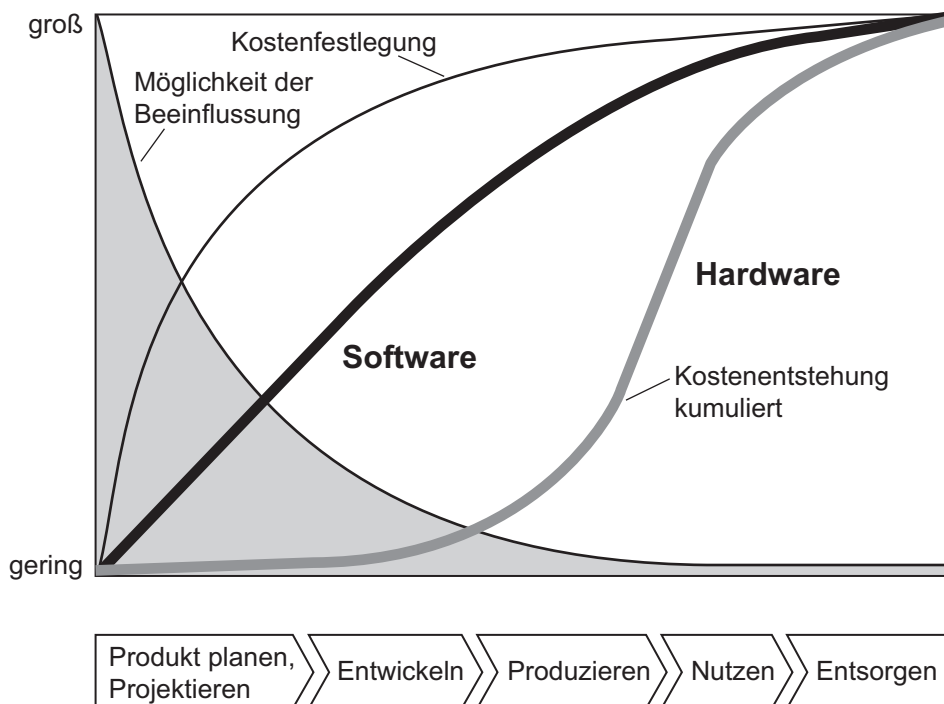


Bild 2-6: Unterschiede der Kostenentstehung bei Hardware- [nach EHRENSPIEL ET AL. 2007] und Softwarekomponenten [nach BAUMÖL 1999]

Die genannten Herausforderungen tragen alle samt dazu bei, dass Probleme bei der Einhaltung der Produktkosten in der Industrie weit verbreitet sind. So gaben bei einer Umfrage von Arthur D. Little im Jahre 2003 35 % der Befragten an, dass sie in ihrem Unternehmen Probleme mit der Überschreitung von Produktzielkosten hätten [s. BALAZOVA 2004].

Die Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Methoden und Hilfsmittel zur Unterstützung des Kostenmanagements mechatronischer Produkte ist aus diesem Grund unumgänglich. Möchte man dabei der Interdisziplinarität mechatronischer Produkte ausreichend Rechnung tragen, so bedeutet dies die Berücksichtigung und Integration gewachsener, disziplinspezifischer Ansätze der Kostenplanung, -kontrolle und -steuerung (*Kapitel 3.3 – Grundlagen des Kostenmanagements in der Produktentwicklung*). Um in diesem Zusammenhang den bisher sehr schwach ausgeprägten Prozessbezug des Kostenmanagements mechatronischer Produkte zu erhöhen ist eine Orientierung an den Entwicklungs- und Herstellprozessen der Mechatronik (*Kapitel 3.1 – Grundlagen der Mechatronik*) notwendig. Zusätzlich verlangt die beschriebene Intransparenz der Kostenentstehung, die im Grunde auf eine Intransparenz der interdisziplinären Zusammenhänge in den Produkten an sich zurück zu führen ist, nach der Integration von Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements in den zu entwickelnden Ansatz (*Kapitel 3.2 – Grundlagen des Komplexitätsmanagements*).

3 Stand der Forschung und Technik

Nachdem die vorangehenden Kapitel die Motivation der vorliegenden Arbeit darlegen, beschreibt dieses nun die Grundlagen, welche in die Erarbeitung des in Kapitel 5 vorgestellten Lösungsansatzes einfließen. Kapitel 2 lässt bereits durchblicken, dass es sich beim Kostenmanagement mechatronischer Produkte um ein sehr vielschichtiges Thema handelt, bei dessen Bearbeitung Kenntnisse aus unterschiedlichen Forschungsbereichen berücksichtigt werden müssen. Somit gliedert sich der Stand der Forschung und Technik in die drei Themengebiete „Grundlagen der Mechatronik“, „Grundlagen des Komplexitätsmanagements“ sowie „Grundlagen des Kostenmanagements“. Jedes dieser Teilkapitel schließt mit einer Zusammenfassung und der Darlegung der in Hinblick auf das Kostenmanagement mechatronischer Produkte identifizierte Defizite. Diese fließen in die Ableitung von Handlungsschwerpunkten und die Formulierung von Anforderungen ein, die in Kapitel 4 vorgestellt werden.

Diente in Kapitel 1 und 2 das Automobil bzw. einzelne Teilsysteme als Erläuterungsbeispiele, so wurde für dieses Kapitel, welches tiefer in die technischen Zusammenhänge blickt, das überschaubarere Beispiel einer digitalen Spiegelreflexkamera gewählt. Durch die Unterschiede der Beispiele wird zudem gezeigt, dass die hier dargelegten Inhalte nicht branchenbezogen, sondern übergreifend gültig sind.

3.1 Grundlagen der Entwicklung mechatronischer Produkte

Viele Produkte unseres täglichen Gebrauchs – aber auch z. B. Fertigungsanlagen der Industrie – haben sich über die letzten Jahrzehnte hinweg maßgeblich verändert (siehe Bild 3-1). Diese Veränderung bezieht sich nicht nur auf das offensichtliche Äußere der Produkte, sondern insbesondere auf die Art und Weise der Funktionserbringung. Stellvertretend für eine Reihe von Beispielen sei an dieser Stelle der Übergang von der klassischen zur digitalen Fotografie genannt, der weit mehr mit sich brachte als den bloßen Wechsel des Aufnahmemediums von Film zu CCD-Chip. Im Gegensatz zur mechanischen Kamera, bei der die Einstellung von Blende, Belichtungszeit und Bildschärfe manuell erfolgt, ist das mechatronische System in der Lage, über entsprechende Sensoren Informationen aus der Umgebung zu erfassen und die erforderlichen Einstellungen selbstständig durchzuführen. Dies wird erreicht, indem die mechanischen Kopplungen zwischen den einzelnen Elementen durch elektronisch-informationstechnische Kopplungen ersetzt werden. Die Informationsverarbeitung ermittelt aus den elektronischen Signalen der Sensoren mit Hilfe der in der Software implementierten Algorithmen die jeweils günstigste Einstellung und stellt die Signale für die verschiedenen Antriebe bereit [STETTER & NIEDERMEIER 2007; JANSEN 2007, S.2F].



Bild 3-1: Wandel der Spiegelreflexkamera vom rein mechanischen hin zum mechatronischen System
(Bilder mit freundlicher Genehmigung von Canon)

Wie das Beispiel zeigt, ist das primäre Ziel der Mechatronik die Optimierung eines – zuvor meist rein mechanischen – Grundsystems in Hinblick auf die zur Verfügung gestellte Funktionalität. Erreicht wird dies durch die Integration von Wirkprinzipien weiterer technischer Disziplinen [VDI 2004, S.2; JANSEN 2007, S.3]. In den folgenden Teilkapiteln wird nach der Darstellung grundlegender Definitionen das resultierende Zusammenspiel der Disziplinen im Produkt aber auch im Produkterstellungsprozess näher erörtert.

3.1.1 Der Systembegriff in der Mechatronik

Mechatronik

Erstmals geprägt wurde der Begriff *mechatronics* 1969 durch den japanischen Industriellen Ko Kikuchi [HARASHIMA ET AL. 1996]. Der Präsident des Herstellers automatisierungstechnischer Produkte (YASKAWA Electric Corporation) schuf das Kunstwort aus der Zusammensetzung der Begriffe *mechanism* (später *mechanics*) und *electronics* und beschrieb damit die Funktionserweiterung mechanischer Komponenten. Mit dem Aufkommen der Mikroelektronik und besonders der Mikroprozessortechnik ist die Informationstechnik als weiterer Bestandteil der Mechatronik hinzugekommen [VDI 2004, S.5].

Eine einheitliche Definition des Begriffs Mechatronik hat sich bis heute nicht herausgebildet. Dies mag hauptsächlich daran liegen, dass unterschiedliche Definitionen unterschiedliche Aspekte der Mechatronik betonen. So stellt die folgende Definition von BUUR [1990, S.18] insbesondere das funktionale Zusammenwirken und die räumliche Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik in den Vordergrund:

“Mechatronics is a technology which combines mechanics with electronics and information technology to form both functional interaction and spatial integration in components, modules, products and systems.”

ISERMANN [2007, S.3F] hingegen hebt die angestrebten Synergien zwischen diesen drei Disziplinen hervor:

“Mechatronik [...] ist ein interdisziplinäres Gebiet, bei dem folgende Disziplinen zusammen wirken:

- *Mechanische und mit ihnen gekoppelte Systeme*
- *Elektronische Systeme*
- *Informationstechnik*

Dabei ist das mechanische System im Hinblick auf die Funktion dominierend. Es werden synergetische Effekte angestrebt, die mehr beinhalten als die reine Addition der Disziplinen.”

Diese Definition bringt zum Ausdruck, dass ggf. neben den mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Prozessen z. B. auch optische, thermodynamische oder chemische Prozesse eine Rolle spielen und sich in entsprechenden Teilsystemen niederschlagen können. Ferner wird durch den Hinweis auf die Dominanz des mechanischen Systems eine Abgrenzung zu rein informationsverarbeitenden Systemen geschaffen [JANSEN 2007, S.8].

Die weit verbreitete Definition von HARASHIMA ET AL. [1996], welche auch in die VDI-Richtlinie 2206 [VDI 2004, S.7] übernommen wurde, legt besonderes Augenmerk auf die Zusammenführung der Disziplinen im Rahmen des Entwurfs und der Fertigung mechatronischer Erzeugnisse:

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

Als Zusammenfassung der ausgewählten und hier vorgestellten Definitionen bedeutet Mechatronik im Verständnis der vorliegenden Arbeit die funktionale und räumliche Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik mit dem Ziel der Schaffung und Nutzung von Synergien in Hinblick auf die Funktionserfüllung mechatronischer Erzeugnisse. Die Erstellung mechatronischer Erzeugnisse bedarf dabei eines inter- bzw. transdisziplinären Prozesses.

System und Systemstruktur

Laut oben stehender Definition stellt die Mechatronik somit einen Ansatz zur Entwicklung und Herstellung einer bestimmten Klasse technischer Systeme dar. Ein technisches System ist laut VDI-Richtlinie 2221 [VDI 1993, S.41] folgendermaßen definiert:

„Gesamtheit von der Umgebung abgrenzbarer (Systemgrenzen), geordneter und verknüpfter Elemente, die mit dieser durch technische Eingangs- und Ausgangsgrößen in Verbindung stehen.”

Das grundlegende Verständnis des Aufbaus eines Systems aus Elementen und Relationen beruht dabei auf der von dem Biologen Ludwig von Bertalanffy begründeten allgemeinen Systemtheorie [BERTALANFFY 1950]. Jedes Element eines Systems kann dabei in sich selbst wiederum ein System darstellen [STEINMEIER 1999, S.14], so dass sich auch das Umfeld eines jeden Systems aus weiteren Systemen zusammen setzen kann.

Jedes System verfügt außerdem über einen bestimmten Zweck. So erfüllt beispielsweise ein technisches System immer eine bestimmte Funktion [BOSSEL 1992; OSSIMITZ 2000]. Die Funktion ist dabei die Verknüpfung der Eingangs- mit den Ausgangsgrößen des Systems [DAENZER & HUBER 2002, S.5F; EHRENSPIEL 2006, S.20]. Um eine Funktion erfüllen zu können muss demnach ein System seinen Zustand ändern können – also ein bestimmtes Systemverhalten aufweisen.

Die Systemstruktur umfasst die Elemente und Relationen des Systems und beschreibt dabei die Ausprägung und Anordnung der Elemente und Relationen.

Es existieren unterschiedliche Strukturformen wie beispielsweise Sternstrukturen, Netzwerkstrukturen, Strukturen mit Rückkopplungen oder hierarchische Strukturen. [PATZAK 1982, S.39FF; BRUNS 1991, S.49FF; DAENZER & HUBER 2002, S.6].

Nicht nur aus den unterschiedlichen Strukturformen, sondern auch aus unterschiedlichen Sichten auf ein System entstehen unterschiedliche Ausprägungen der Systemstruktur. So können für ein technisches System beispielsweise Komponenten- und Funktionsstrukturen aufgestellt werden [GÖPFERT 1998, S.75]. Eine Funktionsstruktur beschreibt dabei die Hauptfunktion des betreffenden Systems über den strukturellen Zusammenhang seiner Teilfunktionen. Dieser strukturelle Zusammenhang kann dabei unterschiedlichster Natur sein. So kann eine Funktionsstruktur die hierarchische Gliederung der Systemfunktion in Teilfunktionen oder auch den verursachungsorientierten Zusammenhang dieser Teilfunktionen abbilden.

Dem gegenüber beschreibt die Komponentenstruktur den strukturellen Zusammenhang der Systemkomponenten. Die Systemkomponenten erfüllen in ihrem Zusammenspiel die Systemfunktion. Auch von der Komponentenstruktur kann es unterschiedliche Ausprägungen geben. So ist die bei PAHL ET AL. [2005, S.52] beschriebene Wirkstruktur eine mögliche Ausprägung der Komponentenstruktur. Sie repräsentiert dabei das Zusammenwirken der Systemkomponenten auf Basis physikalischer Effekte [PONN & LINDEMANN 2008]. Eine andere Möglichkeit der Vernetzung von Systemkomponenten besteht aufgrund ihrer gemeinsamen Erbringung von Funktionalität. So wären in dieser Struktur zwei Elemente *A* und *B* miteinander vernetzt, wenn sie gemeinsam zur Erfüllung der Funktion *a* beitragen. Neben dieser n:1 Beziehung zwischen Komponenten und Funktionen existieren auch 1:n bzw. ganz allgemein n:m Beziehungen [ULRICH 1995, S.421] (s. a. Bild 3-2). Die entstehende Beziehungsstruktur zwischen Komponenten und Funktionen ist genauso wie die Funktions- und die Komponentenstruktur Bestandteil der Produktarchitektur und somit ein wesentlicher Gestaltungsgegenstand mechatronischer Produkte [ULRICH & EPPINGER 2003, S.164; GÖPFERT 1998, S.75].

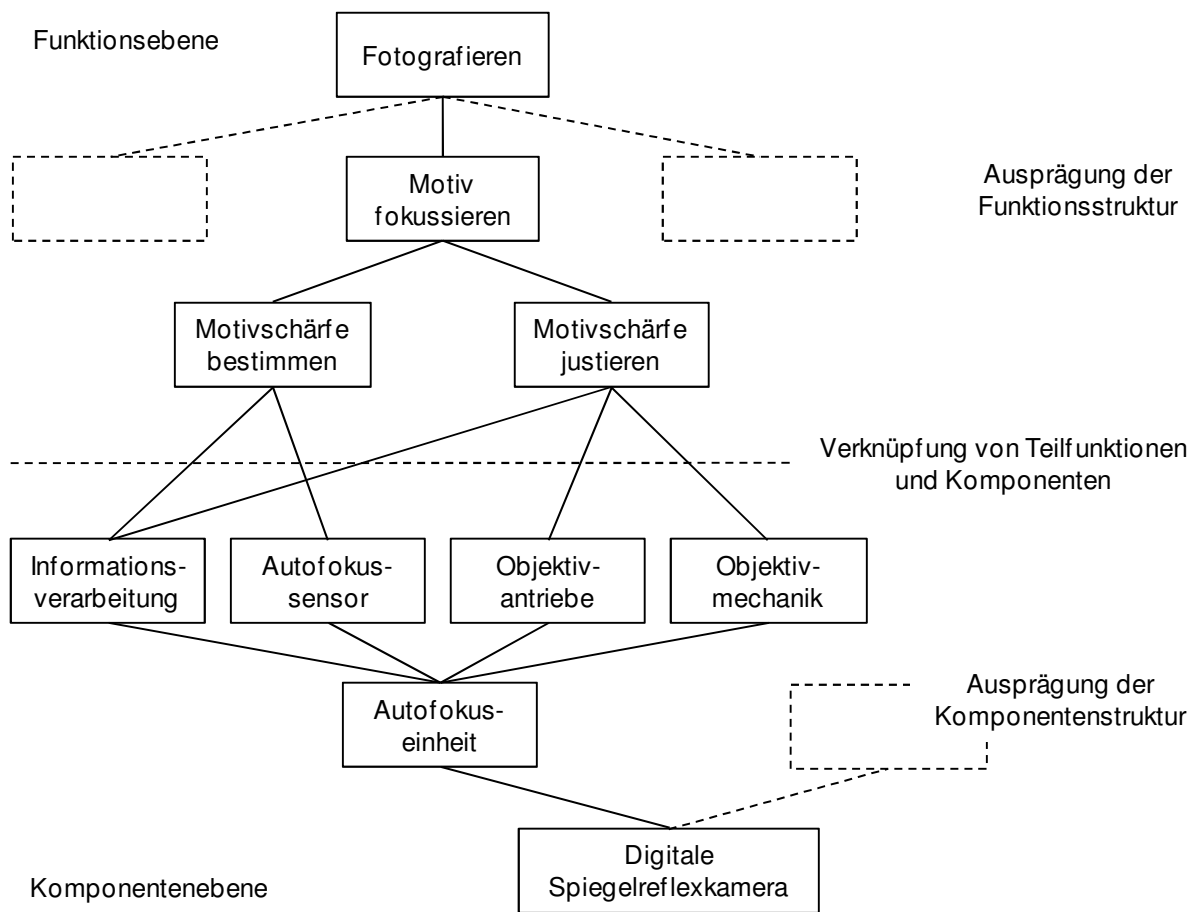


Bild 3-2: Verknüpfung von Funktions- und Komponentenstruktur [nach MARTI 2007, S.41]

Mechatronisches System

Die Elemente bzw. genauer gesagt die Komponenten mechatronischer Systeme lassen sich nach der in der VDI 2206 definierten Grundstruktur mechatronischer Systeme [VDI 2004, S.7] in vier Komponentenklassen kategorisieren (Bild 3-3). So bestehen mechatronische Systeme aus einem in der Regel mechanisch dominierten Grundsystem, das mit der Systemumgebung über einen Energie- oder Stofffluss in Beziehung steht. Das Grundsystem kann auch Teilsysteme anderer Disziplinen wie Fluidmechanik (Hydraulik, Pneumatik), Optik, Thermodynamik etc. umfassen. Allgemein ist jedes beliebige mechanische System denkbar [VDI 2004, S.8].

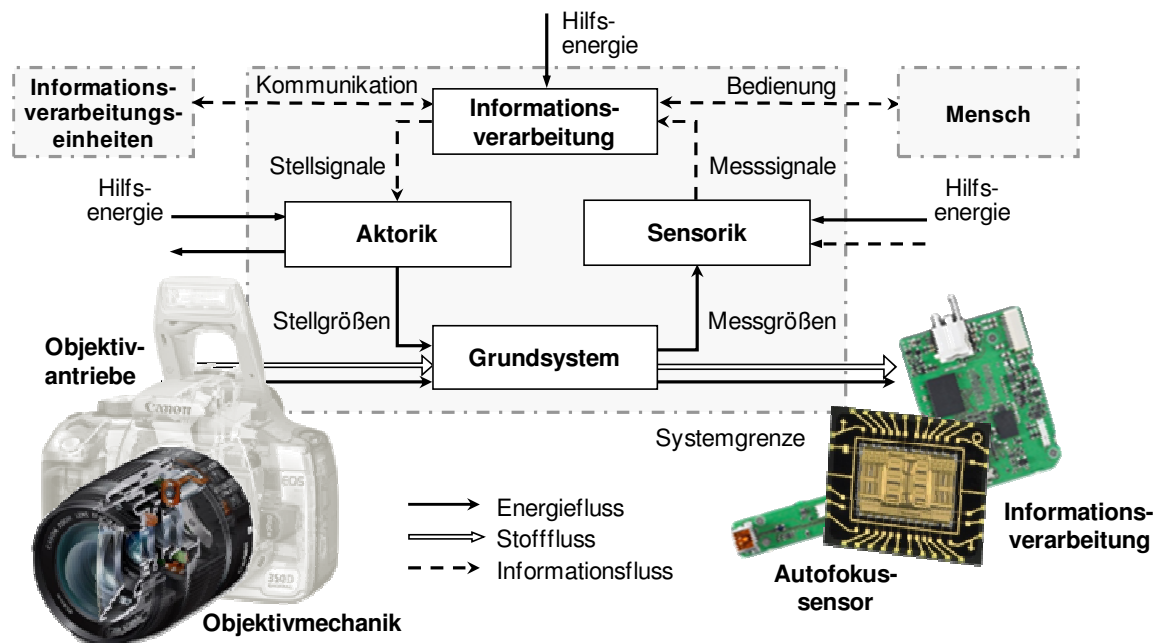


Bild 3-3: Die Grundstruktur eines mechatronischen Systems am Beispiel einer vereinfachten Autofokuseinheit (Bilder mit freundlicher Genehmigung von Canon)

Das gewünschte Verhalten des Grundsystems wird durch Aktoren herbeigeführt, die hierzu die von der Informationsverarbeitung bereitgestellten elektrischen Stellsignale in nichtelektrische Stellgrößen wandeln und auf diese Weise die Zustandsgrößen des Systems beeinflussen. Die Stellsignale werden von der Informationsverarbeitung unter Berücksichtigung der von der Sensorik gelieferten Messsignale und ggf. weiterer Informationen generiert. Letztere können z. B. aus der Bedienung durch den Menschen oder aus der Kommunikation mit anderen technischen Systemen herrühren. Die Messsignale repräsentieren dabei Zustandsgrößen des Systems oder der Umgebung, die von Sensoren erfasst und in die gewünschte elektrische Signalform überführt werden [JANSEN 2007, S.11].

Diese beschriebene Grundstruktur eines mechatronischen Systems ist als Grundbaustein [VDI 2004, S.8] oder auch mechatronisches Funktionsmodul MFM [LÜCKEL ET AL. 2000] zu verstehen (s. Bild 3-4). Durch eine physikalische bzw. informationstechnische Kopplung mechatronischer Funktionsmodule lassen sich modular aufgebaute Gesamtsysteme realisieren. Dabei können sowohl hierarchische als auch nicht-hierarchische Beziehungen zwischen den Modulen bestehen. Informationstechnisch und/oder mechanisch gekoppelte MFM führen zu autonomen mechatronischen Systemen (AMS). In der zentralen Informationsverarbeitung eines AMS werden übergeordnete Aufgaben wie beispielsweise die Überwachung mit Fehlerdiagnose und Instandhaltungsentscheidungen realisiert, sowie Vorgaben für die lokale Informationsverarbeitung der MFMs generiert. Ein Verbund aus AMS bildet ein so genanntes vernetztes mechatronisches System (VMS). VMS entstehen allein durch die Kopplung der beteiligten AMS via Informationsverarbeitung. Analog zu AMS werden in der Informationsverarbeitung von VMS übergeordnete Aufgaben realisiert [LÜCKEL ET AL. 2000]. Übertragen auf

das Beispiel einer digitalen Spiegelreflexkamera ist die Autofokuseinheit ein MFM, die Kamera ein AMS und der Verbund aus Kamera, Beamer und Drucker ein VMS.

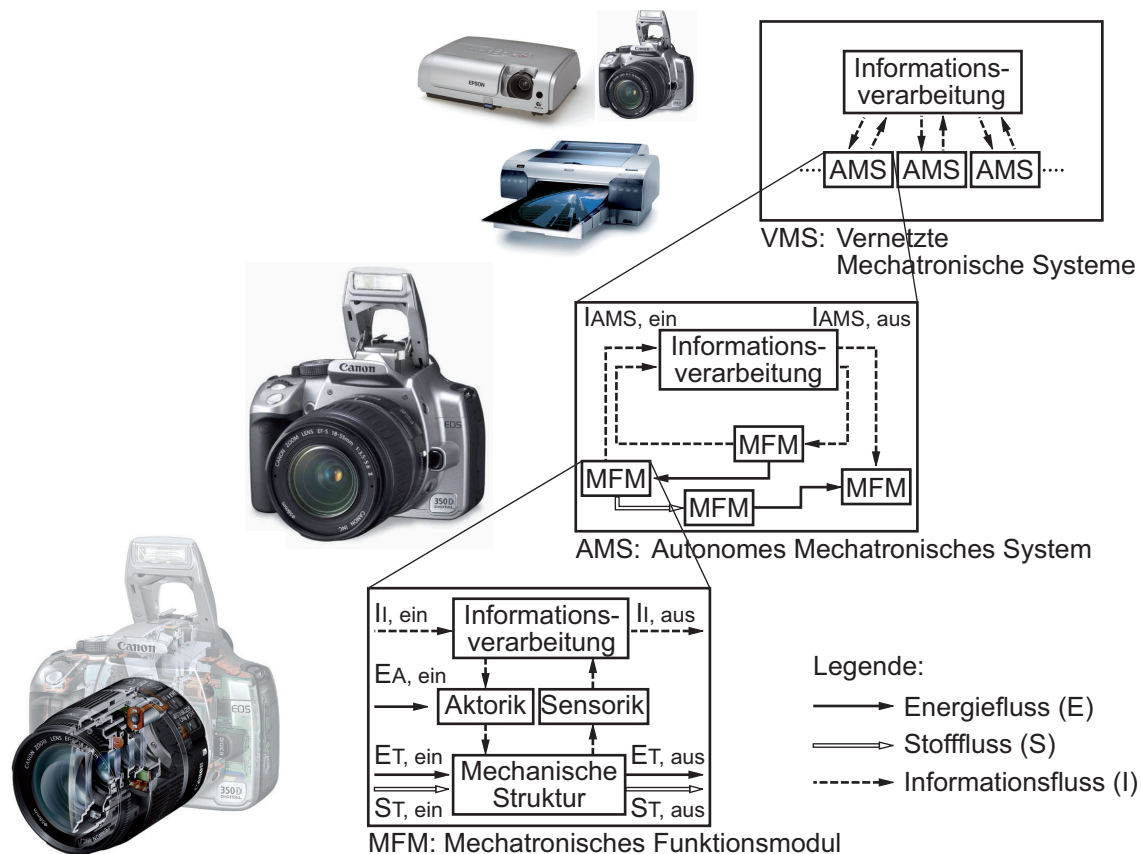


Bild 3-4: Strukturierung mechatronischer Systeme [nach LÜCKEL ET AL. 2000]
(Bilder mit freundlicher Genehmigung von Canon und Epson)

3.1.2 Das Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen in mechatronischen Systemen

Auf Basis der dargelegten Grundstruktur mechatronischer Systeme lassen sich zunächst einmal die Disziplinen identifizieren welche in der Regel maßgeblich zur Realisierung eines mechatronischen Produktes beitragen:

Mechanik

Wie bereits im vorangehenden Kapitel erwähnt ist das Grundsystem mechatronischer Systeme zumeist mechanisch dominiert. Die Aufgabe der Mechanik besteht somit in der Festlegung der Gestalt, des Materials und der Anordnung der das mechatronische System (nach außen hin) repräsentierenden Körper. Sie widmet sich also all jenen Funktionen des mechatronischen Systems, die unter Nutzung mechanischer Gesetzmäßigkeiten realisiert werden sollen. Dies umfasst sowohl bewegte Komponenten, die eine mechanische Leistung über-

tragen oder zugeführt bekommen, als auch ruhende Teilsysteme, die nicht unmittelbar am Leistungsfluss beteiligt sind und passive Funktionen wie Lagerungs-, Stütz- oder Gehäuseaufgaben übernehmen. Da sich die Mechanik hinsichtlich des Aggregatzustandes der beteiligten Körper in die Bereiche Festkörper- und Fluidmechanik einteilen lässt, können im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit die technischen Gebiete Hydraulik und Pneumatik, die auf einer kombinierten Nutzung festkörper- und fluidmechanischer Effekte basieren, ebenfalls der mechanischen Domäne zugeordnet werden [JANSEN 2007, S.23].

Elektrotechnik

Die Funktion der Elektronik in mechatronischen Systemen liegt in erster Linie in der Informationsverarbeitung. Dazu zählt das Erfassen von Informationen über das System und seine Umwelt, das Bestimmen der erforderlichen Einwirkungen, um den gewünschten Zustand zu erreichen, und das Ansteuern der Aktoren. Darüber hinaus zählen auch die Anpassung, Wandlung und Verstärkung von Mess- und Ansteuersignalen zum Funktionsumfang der Elektronik [VDI 2004, S. 14ff; ISERMANN 2007, S. 5ff]. Sensoren und Aktoren stellen die Schnittstellen der Elektronik zum Grundsystem dar. Sie wandeln nichtelektrische in elektrische Größen und umgekehrt. Somit ist die Aufgabe der Elektrotechnik der Entwurf der elektronischen Schaltkreise und die Auswahl der elektronischen Bauteile [MICHELS 2007, S.34]. Bei den Bauteilen kann zwischen passiven und aktiven Bauteilen, die jeweils definierte Übertragungseigenschaften besitzen, unterschieden werden. In Abhängigkeit davon, ob bei einem elektrischen Teilsystem der Energie- oder Informationsumsatz im Vordergrund steht, unterscheidet man zwischen Leistungs- und Signalelektronik. Darüber hinaus lässt sich je nach Art der Informationsrepräsentation eine Unterteilung in Analog- und Digitalelektronik vornehmen [JANSEN 2007, S.24].

Durch die Nutzung elektrodynamischer Gesetzmäßigkeiten zur physikalischen Realisierung informationsverarbeitender Funktionen ist es möglich, hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten bei geringem Leistungsbedarf zu erzielen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zu mechanischen oder hydraulischen Prinzipien, wie sie früher zur Informationsverarbeitung zum Einsatz kamen, keine Massen bewegt werden müssen. Dies und die gute Miniaturisierbarkeit haben dazu geführt, dass die physikalische Ebene der Informationsverarbeitung heute fast ausschließlich durch die Elektrotechnik repräsentiert wird [JANSEN 2007, S.24].

Informationstechnik

Die Informationstechnik lässt sich ebenso wie zuvor die Elektrotechnik der Informationsverarbeitung im Rahmen der mechatronischen Grundstruktur zuordnen und ist deshalb auch sehr eng mit dieser verknüpft. So ist der Übergang von der Informationstechnik zur Elektrotechnik auf der Hardwareseite nahezu fließend. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Grenze zwischen dem Übergang von der analogen zur digitalen Signalverarbeitung gezogen. So werden Komponenten, die der rein digitalen Signalverarbeitung dienen, der Informationstechnik zugeordnet. Diese umfasst insbesondere die zum Betrieb des mechatronischen Systems erforderliche Software, aber auch die zugehörige programmierbare Hardware sowie nicht-programmierbare Logikbausteine, sofern nicht deren physikalische Eigenschaften sondern die Funktionalität in Form von arithmetischen und logischen Operationen im Vordergrund steht [JANSEN 2007, S.24].

Regelungs- und Steuerungstechnik

Entgegen der eingangs referenzierten Definitionen der Mechatronik wird auch die Regelungstechnik in vielen Arbeiten als eine an der Erstellung mechatronischer Produkte beteiligte Disziplin angesehen [GAUSEMEIER ET AL. 2001, S.33; LIPPOLD 2001, S.10]. Ziel der Regelungstechnik ist, das Verhalten des mechatronischen Systems gezielt zu beeinflussen. Ihre Aufgabe liegt darin, aus den relevanten Zustandsgrößen des Systems und der so genannten Führungsgröße über den Regelalgorithmus die Stellgrößen zu bestimmen. Das Stellglied (Aktoren) wirkt entsprechend der Stellgröße auf das System ein [FÖLLINGER 2008, S.3F].

Kennzeichnend für eine Regelung ist, dass der Istwert der Regelgröße fortlaufend gemessen und mit dem Sollwert der Führungsgröße verglichen wird. Unter Berücksichtigung des Vergleichsergebnisses wird die Regelgröße so beeinflusst, dass sie sich der Führungsgröße angleicht [LUTZ & WENDT 1998, S.27]. Neben den sich daraus ergebenden geschlossenen Regelkreisstrukturen enthalten mechatronische Systeme häufig auch offene Steuerketten, bei denen keine Rückführung des Istwertes erfolgt.

Die Regelungs- und Steuerungstechnik ist den bisher betrachteten Domänen gewissermaßen überlagert, da sie die aus der Kombination mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Teilsysteme resultierende Struktur des Gesamtsystems berücksichtigen muss, um dessen Verhalten in der gewünschten Weise zu beeinflussen.

Für die technische Umsetzung der regelungs- und steuerungstechnischen Funktionen muss auf eine oder mehrere andere Domänen zurückgegriffen werden, mit deren Hilfe die mathematischen Funktionen und Algorithmen im mechatronischen System abgebildet werden können. Hierzu bieten sich wegen des stark informationsverarbeitenden Charakters dieser Aufgabe insbesondere die informationstechnische und die elektrotechnische Domäne an. Entsprechend häufig erfolgt die Umsetzung der Regelung und Steuerung unter Nutzung dieser Disziplinen. In bestimmten Fällen kann es dennoch sinnvoll sein, die erforderlichen Funktionen vollständig innerhalb der mechanischen Domäne zu realisieren [BUUR 1990, S.81F]. Hierdurch entfällt die Energie- und Signalwandlung zwischen der Mechanik und der Elektronik und es muss keine elektrische Hilfsenergie bereitgestellt werden. Derartige Realisierungen sind z. B. in Druck- und Volumenstromreglern hydraulischer Systeme zu finden [JANSEN 2007, S.25].

Die beschriebenen Domänen stellen Wissensgebiete dar, die im mechatronischen Entwicklungsprozess zusammengeführt werden und an Planung, Konzeption, Entwurf und Realisierung des mechatronischen Systems beteiligt sind. Darüber hinaus manifestieren sich die Domänen Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik in Form konkreter Komponenten sowie deren Anordnung und Kopplung in der Komponentenstruktur eines mechatronischen Systems [JANSEN 2007, S.26]. Bild 3-5 verdeutlicht das Zusammenspiel der Disziplinen anhand der Zuordnung der Elemente der mechatronischen Grundstruktur. So wird ersichtlich, dass die Elektrotechnik ein Bindeglied zwischen der analogen Welt der Mechanik und der digitalen Welt der Informationstechnik darstellt. Der Übergang von der Mechanik zur Elektrotechnik erfolgt dabei ganz konkret über Sensoren bzw. Aktoren, während der Übergang von der Elektrotechnik zur Informationstechnik wie bereits erwähnt eher fließend ist.

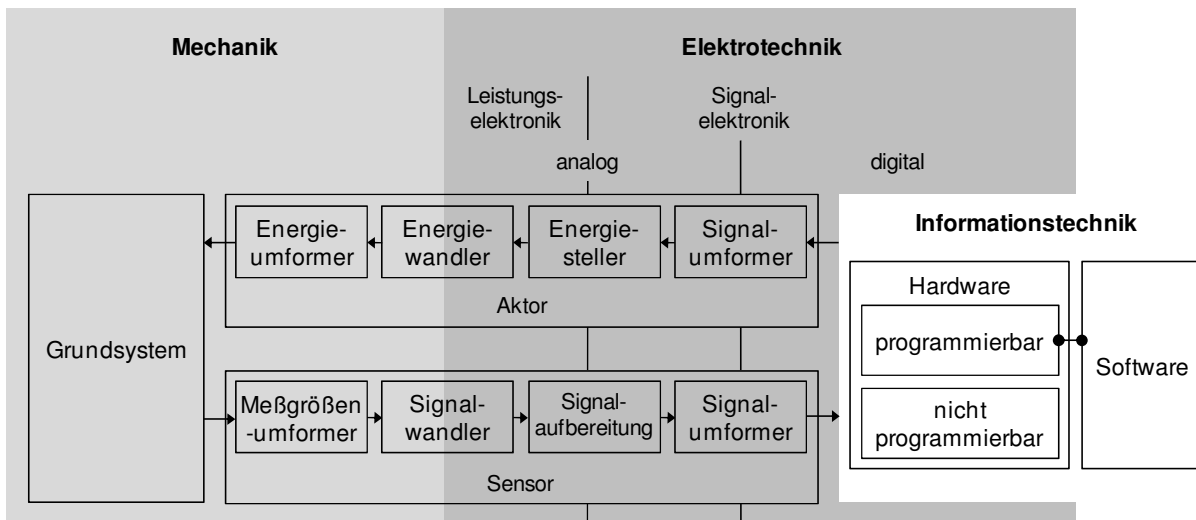


Bild 3-5: Zusammenwirken der Disziplinen im mechatronischen System [nach JANSEN 2007, S.26]

3.1.3 Produktentwicklung in der Mechatronik

Das vorangehende Kapitel zeigt deutlich wie eng unterschiedliche technische Disziplinen in mechatronischen Systemen verknüpft sind. Dies resultiert in einer Transdisziplinarisierung der Erstellung mechatronischer Produkte.

Der **Produkterstellungsprozess** ist der gesamte Prozess, der abläuft, bis ein Produkt genutzt werden kann: von der Ideensuche bis zur Auslieferung des Produkts an den Nutzer [EHRENSPIEL 2006, S. 1]. Als Teilmenge des Produkterstellungsprozesses umfasst der Produktentstehungsprozess die Funktionsbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung [GAUSEMEIER ET AL. 2006, S. 31]. Unter **Produktentwicklung** wird dabei der Vorgang verstanden, den ein Produkt von der ersten Idee bis zum Fertigungsbeginn durchläuft [EHRENSPIEL 2006, S.1].

Damit die beteiligten Individuen und Gruppen diesen Gesamtprozess überschauen können, werden die Abläufe der Produktentwicklung in einzelne, logisch abgrenzbare Abschnitte unterteilt, welche in ihrer Handlungsfolge in Form von Vorgehensmodellen abgebildet werden. **Vorgehensmodelle** stellen somit ein Hilfsmittel dar, das den Entwickler bei der Planung zukünftiger Prozesse, der Orientierung innerhalb aktueller Prozesse und der Reflexion abgeschlossener Prozesse unterstützt [PONN & LINDEMANN 2008, S.14; LINDEMANN 2009, S.35FF]. Vorgehensmodelle können Handlungen auf der Ebene elementarer Denk- und Handlungsabläufe wiedergeben (**Mikroebene**) und haben hier tendenziell deskriptiven Charakter. Daneben können Vorgehensmodelle Vorgänge auf der Ebene operativer Arbeitsschritte beschreiben. Schließlich existieren Vorgehensmodelle, welche größere Arbeitsabschnitte bzw. Phasen darstellen (**Makroebene**) und in der Regel präskriptiven Charakter besitzen [PONN 2007, S.70].

Neben Vorgehensmodellen stellen **Methoden** für die Unterstützung von Entwicklungsprozessen ein wichtiges Hilfsmittel dar. Der Begriff Methode kennzeichnet die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. Für etliche Methoden stehen unterstützende **Werkzeuge** zur Verfügung, welche die Anwendung effektiver und effizienter machen sollen. Die Bandbreite, die der Begriff Werkzeug abdeckt, ist groß und reicht von einfachen **Hilfsmitteln**, wie z. B. Formblättern und Checklisten, bis hin zu komplexer Software, beispielsweise zur Simulation [PONN 2007, S.15].

Als Resultat der bereits beschriebenen Interdisziplinarität mechatronischer Produkte ist ihre Entwicklung stark durch die beteiligten Disziplinen geprägt, die jeweils über eigene Begriffswelten, Erfahrungen und über Jahrzehnte gewachsene Vorgehensmodelle und Methoden verfügen⁴. Diese **disziplinspezifischen Vorgehensmodelle** bilden die Grundlage für den Großteil der existierenden **disziplinübergreifenden Vorgehensmodelle**⁵ [MÖHRINGER 2005].

Als praxisorientierter Leitfaden für die systematische Entwicklung mechatronischer Produkte versteht sich die VDI Richtlinie **VDI 2206** [VDI 2004]. Sie hat dabei nach eigener Aussage nicht zum Ziel „die bewährten Leitfäden wie z. B. die VDI-Richtlinien und eingeführte domänenspezifische Entwurfsmethoden [zu ersetzen], sondern führt diese zusammen.“. Die im Rahmen der Richtlinie vorgestellte Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme basiert auf einem allgemeinen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene und dem V-Modell auf der Makroebene (Bild 3-6). Zusätzlich werden Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte vordefiniert.

Der **Problemlösungszyklus** der Mikroebene ist zurück zu führen auf das bei DAENZER & HUBER [2002] beschriebene Vorgehensmodell des Systems Engineering⁶. Er beschreibt eine generelle Vorgehensweise zur Planung und Durchführung effektiven Problemlösens. Ausgangspunkt ist entweder eine Analyse der Ist-Situation und eine darauf aufbauende Zielformulierung oder eine Zielübernahme und eine daran orientierte Situationsanalyse. Anschließend erfolgt in einem Wechselspiel aus Synthese- und Analyseschritten die Suche nach Lösungen für die gegebene Problemstellung. Die Lösungen werden daraufhin einer Bewertung anhand der in den vorherigen Schritten ermittelten Kriterien unterzogen. Im nächsten Schritt wird entschieden, welche der erzeugten Lösungsalternativen weiterverfolgt werden sollen. Erfüllt keine der Lösungen die Anforderungen, so ist eine Rückkehr zur Situationsanalyse und Zielformulierung erforderlich. Andernfalls kann das weitere Vorgehen geplant werden, wobei die Ergebnisse ggf. als Grundlage weiterer Problemlösungszyklen dienen.

⁴ Ausführliche Beschreibungen und auch Gegenüberstellungen von disziplinspezifischen Vorgehensmodellen finden sich bei [DIEHL 2009, S.32FF; MÖHRINGER 2005].

⁵ Ausführliche Beschreibungen und auch Gegenüberstellungen von disziplinübergreifenden Vorgehensmodellen finden sich bei [DIEHL 2009, S.42FF; FELGEN 2007, S.57FF; MÖHRINGER 2005].

⁶ Das Systems Engineering nach [DAENZER & HUBER 2002] erweitert das Systemdenken der Systemtheorie um Vorgehensmodelle und -strategien.

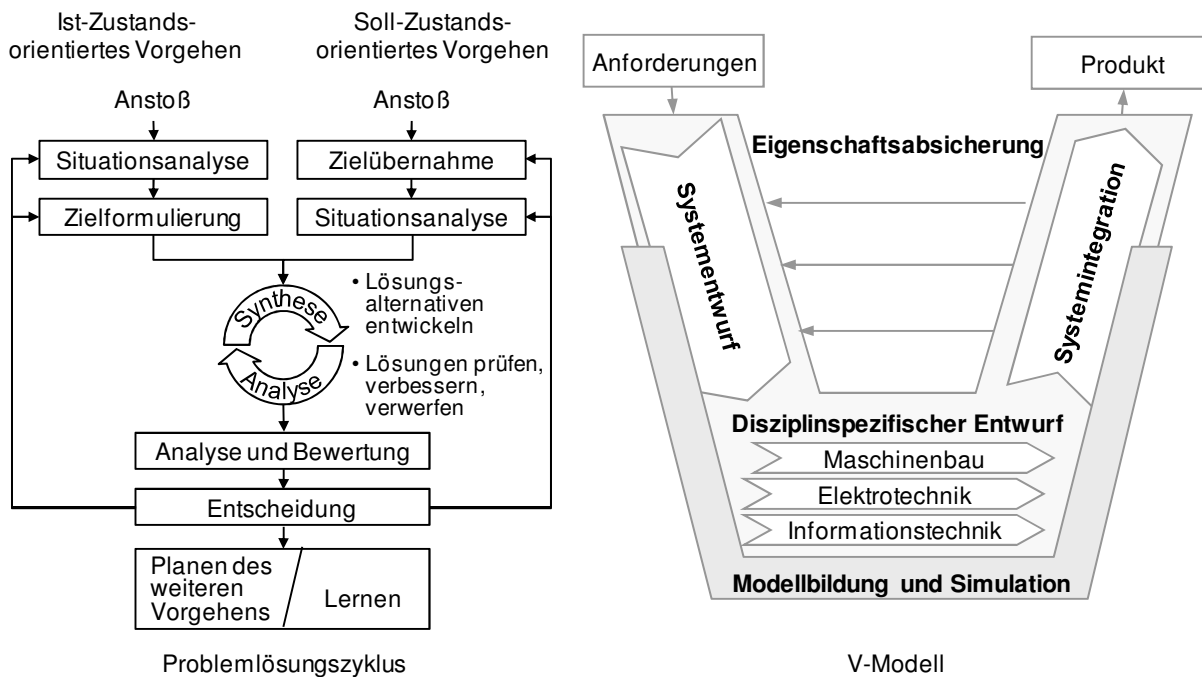


Bild 3-6: Vorgehen der Mikro- und der Makroebene nach VDI 2206 [VDI 2004]

Eine Richtschnur für das grundsätzliche Vorgehen auf der Makroebene bietet das aus der Softwareentwicklung übernommene und an die Anforderungen der Mechatronik angepasste **V-Modell**, das die logische Abfolge wesentlicher Teilschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme beschreibt [BRÖHL & DRÖSCHEL 1995, FLAHT ET AL. 2000]. Das V-Modell setzt sich aus drei Phasen zusammen. Begonnen wird mit dem auf den Anforderungen basierenden, *disziplinübergreifenden Systementwurf*. Ziel hierbei ist das Festlegen eines disziplinübergreifenden Lösungskonzeptes, welches die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen beschreibt. Daran schließt sich der *disziplinspezifische Entwurf* an, in dem das entwickelte Lösungskonzept innerhalb der jeweils zuständigen Disziplinen weiter ausgearbeitet wird. In der *Systemintegration* werden die Ergebnisse aus den Disziplinen dann zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. Dieses Gesamtsystem wird abschließend getestet und mit dem spezifizierten Lösungskonzept abgeglichen.

Im Rahmen des **disziplinübergreifenden Systementwurfs** sind die Möglichkeiten zur Beeinflussung der späteren Produktkosten am Größten. Dies lässt sich damit begründen, dass die Beeinflussbarkeit der Kosten mit fortlaufendem Lebenszyklus sinkt und gemäß der 80/20-Regel, 80 % der Herstellkosten eines Produktes während den ersten 20 % des Konstruktionsprozesses festgelegt werden [SEIDENSCHWARZ 2003, S.441]. Aus diesem Grund konzentrieren sich die im Rahmen der vorliegenden Dissertation vorgestellten Arbeiten zur Optimierung des Zielkostenmanagements mechatronischer Produkte auf diese Phase des Produktentwicklungsprozesses.

3.1.4 Der disziplinübergreifende Systementwurf

Im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs werden die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes in Form eines disziplinübergreifenden Lösungskonzeptes festgelegt. Ziel ist die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzeptes, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreibt. Hierzu wird die Gesamtfunktion eines Systems zunächst in wesentliche, möglichst lösungsneutrale Teilfunktionen zerlegt. Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente (Systemkomponenten) zugeordnet und die Funktionserfüllung wird im Systemzusammenhang geprüft. Das Ergebnis ist die Prinziplösung. Sie bildet die Basis für die weitere Konkretisierung [VDI 2004, S.16].

Die Abfolge der einzelnen Schritte erfolgt jedoch nicht linear, wie vereinfacht in oben stehendem Abschnitt dargestellt. Die Verfeinerung der hierarchischen Funktionsstruktur und der zugehörigen hierarchischen Komponentenstruktur ist vielmehr ein iterativer Prozess wie er auch vom Problemlösungszyklus (vgl. Bild 3-6, links) beschrieben wird. Dabei geht die Funktionsebene im Laufe des Konkretisierungsprozesses über von der Beschreibung des lösungsneutralen Zwecks hin zur Abbildung der lösungsspezifischen Funktionsweise. Parallel wird die Komponentenebene ausgehend von der grundlegenden Wirkstruktur detailliert bis sie das Zusammenspiel einzelner, spezifizierter Bauteile abbildet. Als ein Ergebnis entsteht eine Funktionshierarchie, auf deren Ebenen die einzelnen Funktionen mit den sie realisierenden Systemelementen der korrespondierenden Hierarchieebene der Komponentenebene verknüpft sind [SUH 1998]. Der beschriebene Prozess führt nicht nur zu einem Lösungskonzept sondern zu mehreren Lösungskonzeptalternativen, die vor einer endgültigen Auswahl der zu konkretisierenden Prinziplösung einander gegenüber gestellt und nach zuvor festgelegten Kriterien bewertet werden müssen.

Eine Theorie, die die parallele, hierarchische Konkretisierung von Funktions- und Komponentenstruktur aus Sicht der Wissenschaft näher beschreibt, ist das **Axiomatic Design** [SUH 1998]. Suh beschreibt dabei die Verknüpfung zwischen der Funktionsebene und der physikalischen (Komponenten-)Ebene durch folgende mathematische Gleichung:

$$\{FRs\} = [A]\{DPs\}$$

Die Entwurfsmatrix [A] verknüpft dabei die Entwurfparameter {DPs} einer bestimmten Lösung in eindeutiger Weise mit den Funktionsanforderungen {FRs}. Je nach Ausprägung der Entwurfsmatrix unterscheidet Suh zwischen uncoupled, decoupled und coupled design: Während bei einem „uncoupled design“ jeder Entwurfparameter eindeutig mit einer Funktionsanforderung verknüpft ist, bestehen bei einem „decoupled design“ und einem „coupled design“ Abhängigkeiten zwischen den Entwurfparametern. Ein „uncoupled design“ ist somit ein Sonderfall, der in der Praxis kaum anzutreffen ist.

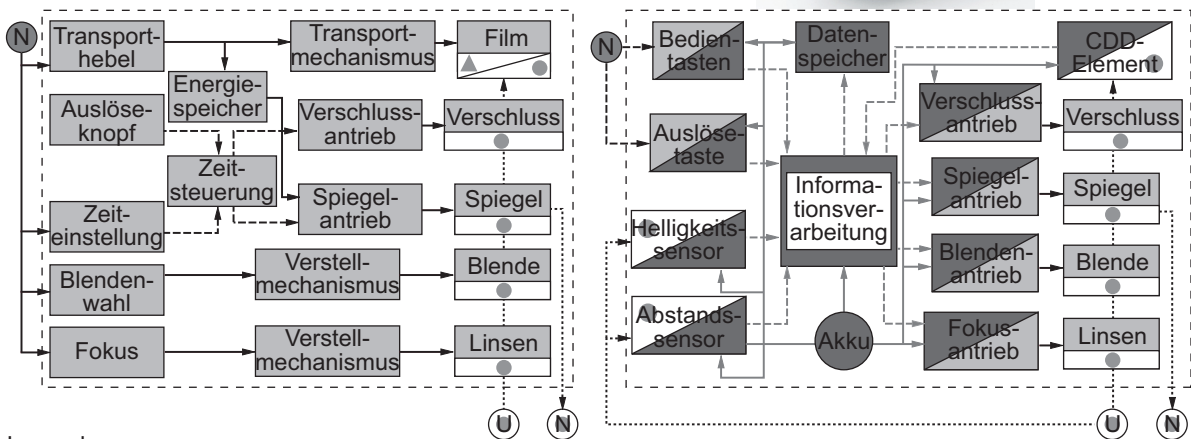
Um das System im Laufe des Produktentwicklungsprozesses weiter zu konkretisieren sieht Suh eine hierarchische Untergliederung des Entwicklungsprozesses vor. Nachdem ein Entwurf auf der physikalischen Ebene auf dem höchsten Abstraktionsniveau abgeschlossen wurde, erfolgt ein Rücksprung in die Funktionsebene. Die Funktionsanforderungen werden weiter untergliedert und dazu geeignete Teillösungen und deren Entwurfsmatrizen auf der physikalischen Ebene erarbeitet. Dieses von Suh als „zigzagging“ bezeichnetes, rekursives Durchlaufen von Prozessphasen wird bis zur vollständigen Definition des Systems wiederholt.

Im Rahmen dieser Konkretisierung und Zuordnung von Teilfunktionen und Teillösungen ist die Entscheidung zu treffen welche Teilfunktionen mechanisch, elektronisch oder informationstechnisch zu realisieren sind. Dabei ergibt sich in der Regel eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten bezüglich der **Disziplinenstruktur**⁷. Unter der Disziplinenstruktur eines mechatronischen Systems versteht man dessen Aufbau hinsichtlich der die einzelnen Teilsysteme bzw. Systemelemente dominierenden Disziplin. Die Disziplinenstruktur beschreibt also, welche Teilsysteme mechanisch, elektronisch oder informationstechnisch realisiert sind und wie sie über Relationen miteinander in Beziehung stehen (Bild 3-7). Der Prozess der Festlegung der Disziplinenstruktur wird als **Partitionierung** bezeichnet [JANSEN 2007, S.2]. Die Partitionierung eines mechatronischen Systems umfasst sowohl funktionale als auch räumliche Aspekte.

Mechanische Spiegelreflexkamera



Digitale Spiegelreflexkamera



Legende

Systemelemente und zugeordnete Domänen:			Multidomänen-Element:	Wandler:	Quelle:	Relationen:
Mechanik	Software	Elektronik				
Optik	Chemie		Domäne A	Domäne A / Domäne B	○	→ (Energie)
			Domäne B		N = Nutzer	→ (Signal)
					U = Umgebung	→ (optisch)

Bild 3-7: Systempartitionierung am Beispiel der Spiegelreflexkamera [JANSEN 2007, S.2] (Bilder mit freundlicher Genehmigung von Canon)

⁷ In der Literatur wird diese oft als Domänenstruktur bezeichnet [vgl. JANSEN 2007, S.8]. Hier erfolgt jedoch eine Anpassung, da der Begriff Domäne im Zusammenhang mit dem im nachfolgenden Kapitel behandelten Komplexitätsmanagement anderweitig belegt ist. Laut DUDEN [1997] ist unter einer *Disziplin* ein Wissenschaftszweig bzw. ein Spezialgebiet einer Wissenschaft zu verstehen. Der Begriff *Domäne* bezeichnet nach dieser Quelle ebenfalls ein Spezialgebiet, sodass die synonyme Verwendung der beiden Begriffe zulässig ist.

Unter der **funktionalen Partitionierung** eines mechatronischen Systems ist die Zuordnung einer Funktion bzw. einer Gruppe von Funktionen des Systems zu einer bestimmten Disziplin (Mechanik, Elektronik, Informationstechnik⁸ etc.) oder Kombination von Disziplinen zu verstehen. Dabei werden auch die Relationen zwischen den Teilfunktionen den verschiedenen Disziplinen zugeordnet. Die **räumliche Partitionierung** umfasst die geometrische Anordnung und bauliche Gruppierung von Systemelementen innerhalb des mechatronischen Systems unter besonderer Berücksichtigung der zu ihrer Realisierung genutzten Disziplinen.

Während die funktionale Partitionierung in einer sehr frühen Entwicklungsphase erfolgt, in der das zu entwickelnde System auf einer abstrakten Ebene beschrieben wird, erstreckt sich die räumliche Partitionierung über mehrere unterschiedliche Entwicklungsstadien mit verschiedenen Konkretisierungsgraden bis weit hinein in den disziplinspezifischen Systementwurf und steht damit nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

Die funktionale Partitionierung erfolgt beim Übergang von der Funktions- zur Wirkebene, da durch die Auswahl von Wirk- bzw. Lösungsprinzipien stets eine Festlegung hinsichtlich der an der Erfüllung der Funktion beteiligten Disziplinen erfolgt. Dabei ist es einerseits möglich, ausgehend von einer lösungs- und domänenneutral formulierten Funktion direkt nach Lösungsprinzipien zu suchen, ohne zuvor festzulegen, welche Disziplinen zur Funktionserfüllung genutzt werden sollen. Die Partitionierung erfolgt in diesem Fall **implizit**, d. h. das Aufstellen, Analysieren und Variieren der Disziplinenstruktur ist kein unmittelbarer Bestandteil des Entwicklungsprozesses. Stattdessen erfolgt die Domänenzuweisung bei der Auswahl der Lösungsprinzipien und deren Verknüpfung zur Wirkstruktur. Jedes Lösungsprinzip enthält dabei Informationen über die genutzten physikalischen oder informationstechnischen Effekte und bestimmt so auch die beteiligten Domänen. Die funktionsorientierte Disziplinenstruktur ließe sich daher aus der Wirkstruktur des Systems ableiten [JANSEN 2007, S.32FF].

Im Gegensatz dazu besteht eine zweite Möglichkeit darin, auf Basis der Funktionen zunächst eine funktionsorientierte Disziplinenstruktur zu generieren, und diese im nächsten Schritt als Grundlage für die Suche nach Lösungsprinzipien zu nutzen. Die funktionale Partitionierung erfolgt in diesem Fall **explizit**, d. h. die Zuordnung zwischen Disziplinen und Funktionen wird als zusätzliche strukturelle Ebene bei der Produktsynthese genutzt. Der lösungsneutrale Charakter der Funktionen wird dabei reduziert. Es wird zwar weiterhin keine Aussage über die zur Funktionserfüllung genutzten physikalischen bzw. informationstechnischen Effekte getroffen, jedoch ist der verfügbare Lösungsraum in Form der zugewiesenen Disziplinen vorgegeben [JANSEN 2007, S.32FF].

In der Praxis dominiert derzeit sicherlich das implizite Vorgehen, was eventuell darauf zurückzuführen ist, dass bislang kaum methodische Grundlagen existieren, die eine explizite Partitionierung unterstützen können [BUUR 1990, S.93; MÖHRINGER 2005, S.90F].

Auf die beschriebene Weise entstehen im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs Lösungskonzeptalternativen, die sich hinsichtlich ihrer Systemstruktur auf unterschiedlichste Weise unterscheiden. Diese Unterschiede gilt es mit geeigneten disziplinübergreifen-

⁸ Innerhalb der Informationstechnik erfolgt zu Beginn des disziplinspezifischen Systementwurfs eine weitere Partitionierung; die so genannte Hardware/Softwarepartitionierung. Bei dieser werden einzelne Tasks auf unterschiedliche Strukturelemente, die entweder hardware- oder softwaretechnisch realisiert sind, verteilt [TEICH & HAUBELT 2007, S.4FF].

den Spezifikationstechniken bzw. Modellierungsmethoden abzubilden um somit eine Basis für die anschließende Konzeptbewertung und -auswahl zu schaffen.

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, lässt sich die Systemstruktur unterscheiden in **Funktions- und Komponentenstruktur**. Diese können sowohl **hierarchisch, flussorientiert** oder anderweitig **vernetzt** aufgebaut sein [PULM 2004, S.160FF]. In der Literatur finden sich zahlreiche Modellierungsmethoden der unterschiedlichen Strukturen. Dabei konzentriert sich eine Vielzahl der existierenden Modellierungsansätze auf die **getrennte Abbildung von Funktions- und Komponentenstruktur** [z. B. VDI 1997A; PAHL ET AL. 2005]. Darüber hinaus finden sich Ansätze, die eine Verknüpfung von Funktions- und Komponentenstruktur vorsehen, diese jedoch in unterschiedlichen Modellen abbilden [z. B. GEHRKE 2005]. Eine direkte Anbindung von Funktions- und Komponentenstruktur findet sich beispielsweise bei ULRICH [1995, S.421] oder auch bei GÖPFERT [1998, S.75]. Weitere Ansätze zur **integrierten Modellierung von Funktions- und Komponentenstruktur** bieten zum Beispiel die SysML⁹ in Form der Interaktionsdiagramme oder der Möglichkeit der Allocation [OMG 2006, S.129FF], das Axiomatic Design [SUH 1998], der Funktion-Mittel-Baum nach TJALVE [1978, S.22] und die in Kapitel 3.2 behandelte Multiple-Domain Matrix [MAURER 2007, S.60].

Von den genannten Modellierungsmethoden bietet die Multiple-Domain Matrix die umfangreichsten Möglichkeiten einer methodisch unterstützten Analyse von Funktions- und Komponentenstruktur (Kapitel 3.2.1). Besonders in den frühen Phasen der Entwicklung, in denen die grundlegenden Relationen zwischen Komponenten festgelegt, jedoch noch nicht quantifiziert werden, ist die Analyse struktureller Zusammenhänge von entscheidender Bedeutung und sollte unbedingt zur Unterstützung der **Konzeptbewertung und -auswahl** heran gezogen werden [ULRICH & EPPINGER 2003, S.167]. Die hierzu notwendige Strukturanalyse wird im Forschungsfeld der Produktentwicklung dem Komplexitätsmanagement zugeordnet. Diesem widmet sich Kapitel 3.2.

Eine Konzeptbewertung kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten wie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Robustheit oder auch Gewicht erfolgen. Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die monetäre Bewertung von Konzeptalternativen um bereits in frühen Phasen, in denen außer den strukturellen noch wenig konkrete Informationen über das spätere Produkt verfügbar sind, ein möglichst kostengünstiges Lösungskonzept auszuwählen. Aus diesem Grund behandelt Kapitel 3.3 die Grundlagen des Kostenmanagements in der Produktentwicklung.

3.1.5 Zusammenfassung und identifizierte Defizite

Im Anschluss an die Definition des dieser Arbeit zugrunde gelegten Verständnisses mechatronischer Systeme (Kapitel 3.1.1) erfolgte eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus selbiger aus mechanischen, elektrotechnischen und informationstechnischen Anteilen. Dabei wurde insbesondere auf das Zusammenspiel der Komponenten unterschiedlicher Disziplinen eingegangen (Kapitel 3.1.2).

⁹ Die Systems Modeling Language (OMG SysML) ist eine auf der Unified Modelling Language (UML) basierende Sprache für die Modellierung komplexer Systeme. Im Jahr 2006 wurde ihre Spezifikation durch die Object Management Group (OMG) veröffentlicht [OMG 2006].

Zentraler Gegenstand des Kapitels 3.1.3 ist der Entwicklungsprozess mechatronischer Produkte. In diesem Zusammenhang wurde die VDI Richtlinie 2206 als ein mögliches Vorgehensmodell vorgestellt. Zu Beginn der Produktentwicklung in der Mechatronik steht der disziplinübergreifende Systementwurf (Kapitel 3.1.4). In dessen Rahmen erfolgt unter anderem die funktionale Partitionierung des Produktes. Hierbei wird die durch das Produkt zu erfüllende Funktionalität auf die beteiligten Disziplinen verteilt. Das heißt es wird entschieden, ob eine Funktion durch mechanische, elektrotechnische oder informationstechnische Komponenten zu erfüllen ist. Ergebnis dieses Schrittes ist die Disziplinenstruktur. Gezeigt wurde, dass die funktionale Partitionierung ebenso wie die weitere Gestaltung der Systemstruktur von entscheidender Bedeutung für die weitere Produktentwicklung ist und wesentlichen Einfluss auf die späteren Eigenschaften, wie z. B. die Kosten, des Produktes hat. So muss zu Ende des disziplinübergreifenden Systementwurfs die Konzeptbewertung und -auswahl, auch unter monetären Gesichtspunkten, auf Basis der bis dahin erarbeiteten Systemstruktur erfolgen.

Trotz der zentralen Bedeutung der aktiven Strukturgestaltung wird ihr bisher in der Forschung noch wenig Beachtung geschenkt. So findet sich zwar mit JANSEN [2007] eine der wenigen Arbeiten zur Partitionierung mechatronischer Produkte, doch bietet er lediglich eine Vorgehensbeschreibung und eine Modellierungssprache zu ihrer Unterstützung. Einen Hinweis darauf, wie eine auch unter Kostenaspekten möglichst optimale Disziplinenstruktur auszusehen hat bzw. wie sie erarbeitet werden kann, gibt er nicht.

Zur Unterstützung der Strukturgestaltung bedarf es außerdem einer Modellierungsmethode, die in der Lage ist, die strukturellen Eigenschaften unterschiedlicher Konzeptalternativen abzubilden und vergleichbar zu machen. Funktions- und Komponentenstruktur müssen hierbei parallel und in direkter Verknüpfung gehandhabt werden können. Außerdem sollte eine entsprechende Modellierungsmethode disziplinübergreifend einsetzbar sein und in Hinblick auf eine spätere Konkretisierung des Systementwurfs in der Lage sein, Informationen disziplinspezifischer Modelle zu integrieren. Nur so kann eine konsistente Datenhaltung über den gesamten Produktentwicklungsprozess hinweg gewährleistet werden.

3.2 Grundlagen des Komplexitätsmanagements

Mechatronische Systeme werden oft mit dem Wort „komplex“ bezeichnet und ihre „Komplexität“ als Rechtfertigung ihres erhöhten Erstellungsaufwandes herangezogen. Leider jedoch wird in diesem Zusammenhang die referenzierte Komplexität oftmals nicht ausreichend und schon gar nicht einheitlich definiert [ESD SYMPOSIUM COMMITTEE 2002, S.4F; WEBER 2005, S.2].

Ein aus der Komplexitätsforschung stammender Ansatz zur Systematisierung verschiedener Theorien der Komplexität von Systemen findet sich bei MANSON [2001]. Er unterscheidet zwischen algorithmischer, deterministischer und aggregierter Komplexität. Die **algorithmische Komplexität** umfasst die mathematische Komplexitätstheorie und die Informationstheorie und wählt den Ansatz, dass die Komplexität eines Systems in der Schwierigkeit seiner Beschreibung liegt. Die **deterministische Komplexität** umfasst die Chaostheorie und die Katastrophentheorie, die davon ausgehen, dass durch Wechselbeziehungen zwischen zwei oder drei Schlüsselparametern ein weitgehend stabiles System entstehen kann, welches jedoch

anfällig für plötzliche Diskontinuitäten ist. Als dritte Form betrachtet die **aggregierte Komplexität** wie Systeme mit komplexem Verhalten durch das Zusammenspiel ihrer einzelnen Elemente entstehen. Während algorithmische und deterministische Theorien die Funktionsweise komplexer Systeme mittels mathematischer Formeln und Annahmen beschreiben ist die aggregierte Komplexität bestrebt, den Holismus und die Synergien zu erschließen, welche durch das Zusammenspiel der Systemelemente entstehen.

MANSON [2001] beschreibt die aggregierte Komplexität eines Systems mittels der Relationen zwischen den Elementen des Systems, der inneren Systemstruktur, der Systemumgebung, des sich entwickelnden Systemverhaltens und der Systemveränderung. Gängige Definitionen der Komplexität im ingenieurtechnischen Umfeld mechatronischer Systeme lassen sich aus der Kombination dieser Aspekte ableiten:

Fasst man die ersten beiden Aspekte zusammen, so erhält man eine Definition der **strukturellen Komplexität**, die laut PATZAK [1982, S.22ff] aus der Anzahl und Verschiedenartigkeit der Systemelemente und deren Beziehung hervorgeht. Die häufigsten Beschreibungen komplexer mechatronischer Systeme beziehen sich auf diese Form der Komplexität. Ihr Ursprung liegt in der Interdisziplinarität der Mechatronik [VDI 2004, S.2]. So besteht die in Bild 3-8 gezeigte Kamera aus ungefähr 365 Komponenten. Lässt man davon die gut 200 Befestigungselemente außer Betracht, so sind neben den knapp 60 % Gehäuseteilen, gut 14 % elektrotechnische Komponenten, davon allein 8 Platinen, 11 % optische Komponenten und 15 % Bedienelemente verbaut¹⁰. Zwischen diesen Komponenten bestehen aufgrund der sie verbindenden Informations-, Energie- und Stoffflüsse unterschiedlichste Relationen.



*Bild 3-8: Digitale Spiegelreflexkamera als Beispiel eines komplexen mechatronischen Systems
(Bilder mit freundlicher Genehmigung von Canon)*

¹⁰ Die dargelegten Zahlen entstammen der Analyse einer Zusammenbaustudie welche an der University of California, Berkeley (USA), als Abschlussarbeit des Kurses E128 „Advanced Engineering Graphical Communication“ entstanden ist (URL: <http://www.youtube.com/watch?v=6-HiBDLVzYw>, entnommen am 23.07.2009).

Betrachtet man nur die beiden letzten der von Manson genannten Aspekte, also das sich entwickelnde Systemverhalten und die Systemveränderung, so erhält man die Indikatoren der **dynamischen Komplexität**. Sie bezieht sich auf die Zustände eines Systems beziehungsweise das Systemverhalten an sich. Neben der Anzahl und den Arten von Zuständen hat die Variabilität der Systemstruktur sowie des Systemverhaltens (Systemfunktion) einen großen Einfluss auf die dynamische Komplexität [DÖRNER 2006, S. 62FF]. Diese Form der Komplexität ist oftmals gemeint, wenn mechatronische Systeme aus der Sicht der Regelungstechnik beschrieben werden.

Da die Systemdynamik im Wesentlichen von der Offenheit des Systems und somit von der Systemumgebung abhängt, geht der Grad der Offenheit der Systemgrenzen in einige Komplexitätsbetrachtungen mit ein [FELGEN 2007, S.15].

Im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt das Management der strukturellen Komplexität mechatronischer Systeme, da es bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung, wo Relationen zwischen Elementen zwar bereits bekannt, jedoch noch nicht quantifizierbar sind, sinnvollen Einsatz finden kann [LINDEMANN ET AL. 2008, S.1]. Außerdem wird der Strukturgestaltung und somit dem Management struktureller Komplexität ein Potenzial der Kostenoptimierung zugesprochen [CHILD ET AL. 1991, S.79]. Dieses ist insbesondere in den frühen Phasen des disziplinübergreifenden Systementwurfs auszuschöpfen.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung mechatronischer Produkte sind vier, untereinander stark vernetzte, Ausprägungen struktureller Komplexität zu berücksichtigen: Marktkomplexität, Organisationskomplexität, Produktkomplexität und Prozesskomplexität [LINDEMANN ET AL. 2008, S.5].

Wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben steht im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs die Partitionierung also die Produktstrukturgestaltung mechatronischer Produkte im Mittelpunkt [JANSEN 2007, S.29FF]. Eine Kostenoptimierung ist in dieser frühen Phase also primär durch eine geeignete Gestaltung der **Produktkomplexität** zu erreichen.

Die Gestaltung der Produktstruktur hat jedoch direkten Einfluss auf die **Prozesskomplexität**, die somit auch in diesen frühen Phasen Berücksichtigung finden sollte. Diese jedoch unter Kostengesichtspunkten zu optimieren ist erst zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess sinnvoll, wenn konkretere Arbeitspläne vorliegen. Die kostenmäßige Optimierung von Entwicklungs- und Herstellprozessen unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen des Komplexitätsmanagements ist bereits weit verbreitet [z. B. CLARKSON ET AL. 2000, S.344FF; BROWNING & EPPINGER 2002]. Auch in Hinsicht auf das Management von Markt- und Organisationskomplexität sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [z. B. FERSHTMAN & KALAI 1993; KILLING 2002].

Die enge Verknüpfung von Produkt- und Prozesskomplexität ist in Bild 3-9 dargestellt. Innerhalb sowie zwischen den hier dargestellten Ebenen – Funktions-, Komponenten-, Prozess- und Ressourcenebene – spiegelt sich die Komplexität eines mechatronischen Produktes und des dazugehörigen Produkterstellungsprozesses wider. Denn auf jeder dieser Ebenen liegt eine Vielzahl verschiedenartiger Elemente. Elemente sind dabei zum Beispiel Elementarfunktionen, einzelne Bauteile, ein Fertigungsschritt bzw. eine verbrauchte Ressource. Diese Elemente können entweder einer der drei Disziplinen zugeordnet werden oder besitzen disziplinübergreifenden Charakter. Außerdem findet man Vernetzungen dieser Elemente sowohl in-

nerhalb einer Ebene, z. B. die Verknüpfung einzelner Funktionen, als auch über Ebenen hinweg, wie beispielsweise bei der Anbindung von Funktionen an die sie erfüllenden Komponenten. Des Weiteren gibt es für jedes Produkt mehrere Möglichkeiten für die Ausbildung der Ebenen und der Verknüpfungen zwischen diesen [BRAUN & LINDEMANN 2007].

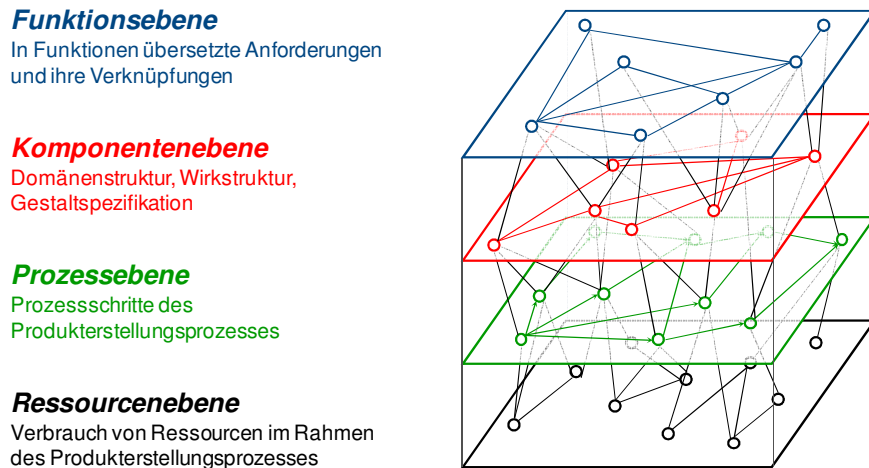


Bild 3-9: Die vielschichtige Abhängigkeitsstruktur mechatronischer Produkte

Viele Arbeiten die dem Gebiet des Komplexitätsmanagements zugeordnet werden drehen sich um varianteninduzierte Komplexität und die daraus resultierenden Komplexitätskosten¹¹ [SCHUH & SCHWENK 2001] und beschäftigen sich somit nahezu ausschließlich mit dem Thema Variantenmanagement.

In der vorliegenden Arbeit ist das Verständnis von Komplexitätsmanagement weiter gefasst. Im Mittelpunkt steht die aktive Gestaltung der Produktstruktur, auch im Sinne einer aktiven Partitionierung, mit dem Ziel eines kostenoptimalen Komplexitätsgrades. Denn eine aktive anstelle einer passiven Strukturgestaltung, wie sie jedoch leider heutzutage weit verbreitet ist (vgl. auch den Abschnitt zur indirekten Partitionierung in Kapitel 3.1.4), hilft sicher zu stellen, ein Produkt gemäß den Anforderungen, also auch gemäß den Zielkosten, zu entwickeln [vgl. LINDEMANN ET AL. 2008, S.10]. Ansätze aktiver Strukturgestaltung finden sich bisher nur vereinzelt. So basieren beispielsweise einige Modularisierungsstrategien auf einer aktiven Strukturgestaltung [z. B. STEFFEN 2006]. Die Bezeichnung optimaler Komplexitätsgrad findet sich bei PUHL [1999, S.20FF]. Für ihn bedeutet Komplexitätsmanagement die „angemessene Handhabung der Komplexität um Ziele zu erreichen und das Potenzial komplexer Kompositionen zu nutzen“ [PUHL 1999, S.23]. Diese Beschreibung berücksichtigt, dass Komplexitätsmanagement nicht nur die Minimierung der Komplexität zum Ziel haben muss. In Bezug auf die entstehenden Kosten heißt dies, dass eine komplexere Struktur durchaus Kostenvorteile gegenüber einer weniger komplexen haben kann. So wie andere Arbeiten nachgewiesen haben, dass bereits in frühen Phasen aus der grundlegenden Struktur eines Systems Rückschlüs-

¹¹ Der Begriff *Komplexitätskosten* ist in der Literatur eng mit dem Variantenmanagement und nicht mit dem hier vertretenen Verständnis von Komplexitätsmanagement verknüpft, so dass er im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht aufgegriffen oder gar adaptiert wird.

se auf sein Verhalten geschlossen werden können [LINDEMANN ET AL. 2008, S.17FF], so zielt die vorliegende Arbeit unter anderem darauf ab, eine Identifizierung von Kostenschwerpunkten und Optimierungsvorschläge auf Basis der strukturellen Gegebenheiten eines Systems abgeben zu können. Des Weiteren hilft der Einsatz der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Modellierungs- und Analysemethoden besonders in der Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs ein übergreifendes Systemverständnis aller am Produktentwicklungsprozess Beteiligten zu erzielen [vgl. BROWNING 2001].

Nach LINDEMANN ET AL. [2008, S.16F] umfasst Komplexitätsmanagement, im Sinne des hier beschriebenen Strukturmanagements, drei Strategien: Erfassen und Bewerten, Vermeiden und Reduzieren sowie Beherrschen und Kontrollieren. Dabei bildet **Erfassen und Bewerten** die Grundlage der beiden weiteren Strategien. Es umfasst das Modellieren und Analysieren der Struktur. Einzusetzende Modellierungsmethoden werden in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Metriken und Kennzahlensysteme zur Bewertung der Komplexität mechatronischer Systeme werden dann im darauf folgenden Kapitel 3.2.2 erläutert. Ziel der dort beschriebenen Strukturanalysen ist das Aufzeigen von Ansatzpunkten einer kostenorientierten Strukturoptimierung. Dies kann das **Vermeiden und Reduzieren** von Komplexität beinhalten. **Beherrschen und Kontrollieren** von Komplexität bedeutet, beispielsweise in der Lage zu sein die Fortpflanzung einer kostenoptimierenden Änderung über die Struktur hinweg vorhersehen und entsprechend handhaben zu können [FLANAGAN ET AL. 2003].

3.2.1 Matrixbasierte Ansätze zur Modellierung komplexer mechatronischer Systeme

In Kapitel 3.1.4 wurden bereits einige Methoden zur Modellierung der Funktions- und Komponentenstruktur mechatronischer Produkte erwähnt. Gemeinsames Ziel aller ist es, einen Systemüberblick zu gewährleisten und so das Systemverständnis der Entwickler zu erhöhen. Nachgewiesener Weise ist allein die systematische Aufbereitung und Auseinandersetzung mit dem Modellierungsobjekt dem Systemverständnis zuträglich [LINDEMANN ET AL. 2008, S.37F]. Zugleich sollen sie eine Basis für Analysen mit anschließender Optimierung oder Entscheidungsfindung bieten.

Die Darstellung der Funktions- bzw. Komponentenstruktur erfolgt bei den verbreiteten Modellierungsmethoden zumeist als Netz. Im mathematischen Sinne können diese Netzstrukturen als Graphen interpretiert werden. Wird nur die Existenz einer Relation zwischen zwei Elementen modelliert, so handelt es sich um einen **ungerichteten Graphen**. Modelle die eine gerichtete Relation zwischen zwei Elementen abbilden, wie beispielsweise das umsatzorientierte Funktionsmodell, welches den Zusammenhang einzelner Funktionen auf Basis der sie verbindenden Energie-, Stoff- und Informationsflüsse abbildet [LINDEMANN 2009, S.119F], stellen einen **gerichteten Graphen** dar. Möchte man neben der Richtung auch noch die Stärke der Verknüpfung abbilden, so kann dies mit Hilfe eines stärkebasierten Graphen erfolgen [LINDEMANN ET AL. 2008, S.48F]. Zur Analyse von Graphen, einzelnen Substrukturen, Elementen und Relationen finden sich in der Graphentheorie zahlreiche Ansätze, die zum Teil in Kapitel 3.2.2 aufgegriffen werden.

Matrizen können die gleichen Informationen abbilden wie Graphen, das heißt jeder Graph kann in eine **Matrix** überführt werden [ANDRÁSFAL 1991, S.133FF]. Ebenso wie graphenbasierte Methoden sind auch matrixbasierte Methoden in der Produktentwicklung weit verbreitet [LINDEMANN ET AL. 2008, S.49]. Seit den 60er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts schlagen zahlreiche Arbeiten matrixbasierte Methoden zur Systemmodellierung und Analyse vor [STEWART 1962; KEHAT & SHACHAM 1973, WARFIELD 1973].

Bisher werden Graphen und Matrizen zur Modellierung und Analyse von Systemen zumeist unabhängig voneinander eingesetzt. Obwohl die Transformationsmöglichkeit zwischen den beiden Darstellungsformen bekannt ist, nützen bisher nur wenige Ansätze das Potenzial der Kombination von Graphen und Matrizen [LINDEMANN ET AL. 2008, S.40]. In der vorliegenden Arbeit bilden Matrizen die Modellierungsbasis. Graphen dienen ergänzend der Visualisierung. Analysen werden sowohl auf der Ebene der Matrizen als auch auf der Ebene der Graphen durchgeführt.

LINDEMANN ET AL. [2008, S.49FF] unterscheiden vier Arten von matrixbasierten Modellierungsmethoden, die im Folgenden näher beschrieben werden: Intra-Domain Matrizen, Inter-Domain Matrizen, kombinierter Einsatz von Intra- und Inter-Domain Matrizen sowie Multiple-Domain Matrizen (MDM).

Ein weit verbreiteter Vertreter der **Intra-Domain Matrizen** ist die 1981 von STEWART [1981] vorgestellte **Design Structure Matrix** (DSM¹²). Die DSM ist eine quadratische Matrix, deren Zeilen und Spalten von oben nach unten bzw. von links nach rechts identisch mit den Namen der Elemente beschriftet sind, die einander in den Matrixzellen gegenübergestellt werden. Besteht eine Verknüpfung zwischen zwei Elementen, so wird diese im Kreuzungspunkt der entsprechenden Zeilen und Spalten kenntlich gemacht. Da ein Zellenpaar, bestehend aus einer Zelle oberhalb der Diagonalen und ihrem Pendant in der unteren Matrixhälfte, die Verbindung derselben Elemente beschreibt, besteht über selektives Ausfüllen der Beiden die Möglichkeit eine Richtungsinformation zu modellieren. Die Zellen der Matrixdiagonalen sind normalerweise nicht besetzt. In der Regel wird innerhalb einer DSM nur eine die Elemente verknüpfende Relationsart abgebildet [LINDEMANN ET AL. 2008, S.51]. Es gibt jedoch Ausnahmen, die die Abbildung unterschiedlicher Relationsarten in eine Matrix integrieren [PIMMLER & EPPINGER 1994; ERIXON 1998; JARRATT 2004]. Diese Modellierung eignet sich jedoch nicht für die im folgenden Kapitel beschriebenen computergestützten Analysemethoden.

Erfolgt die Markierung der verknüpfenden Zellen mittels eines einheitlichen Zeichens, beispielsweise einem X oder einer 1, so handelt es sich um eine so genannte **binäre DSM**. Binäre Matrizen können folglich nur die Existenz und die Richtung einer Verknüpfung abbilden. Gewichtungen bzw. detailliertere Informationen, wie beispielsweise die Stärke der Verknüpfung können mittels einer **numerischen DSM** abgebildet werden.

Des Weiteren unterscheidet man zwischen statischen und dynamischen DSMs. **Statische DSMs** beschreiben Elemente, die parallel existieren, wie beispielsweise Elemente einer Funktions- oder auch einer Komponentenstruktur. In **dynamischen DSMs** hingegen bildet die Anordnung der Zeilen und Spalten einen Zeitstrahl ab. Dies ist beispielsweise bei der Abbildung

¹² In der Literatur wird die DSM auch oftmals als Dependency Structure Matrix, Dependency Map, Interaction Matrix, Incidence Matrix, Precedence Matrix und Problem-Solving Matrix bezeichnet [BROWNING 2001].

einer Prozessstruktur der Fall. Eine solche DSM kann dann, wie bereits erwähnt, als Grundlage für die kostenmäßige Optimierung der Prozessstruktur dienen [z. B. BROWNING & EPPINGER 2002].

Die in Kapitel 3.1.4 erwähnten Methoden zur Modellierung der Funktions- bzw. Komponentenstruktur in frühen Phasen basieren zum Großteil auf der Verknüpfung von Elementen derselben Domäne. Darin enthaltene Strukturinformationen können somit problemlos in eine DSM überführt werden bzw. direkt in ihr modelliert werden. Eine DSM eignet sich zur Abbildung unterschiedlicher Komponentenstrukturen, wie sie aus der Partitionierung im Rahmen des domänenübergreifenden Systementwurfs entstehen, besonders deshalb, da sie eine disziplinunabhängige Modellierungsmethode darstellt, die in ihrem Prinzip von allen technischen Disziplinen verstanden wird. BROWNING [2001] belegt hierzu den erfolgreichen Einsatz von DSMs im Bauingenieurwesen, der Halbleiter-, Automobil-, Foto-, Luftfahrt-, Telekommunikations-, Betriebsanlagen- und Elektronikindustrie. Strukturelle Unterschiede von Lösungsalternativen können sowohl direkt in der DSM als auch bei größeren Systemen durch Ableitung des zugehörigen Graphen intuitiv erkannt werden. Außerdem ermöglicht eine DSM, auch zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess, die Integration bzw. auch Ableitung disziplinspezifischer Partialmodelle, da wie bereits erwähnt beliebige graphenbasierte Modelle in eine entsprechende Matrix überführt werden können. Die Abbildung bloßer Strukturinformationen in Form einer ungerichteten, binären, statischen DSM, bildet in der frühen Phase, in der noch keine weiteren Informationen verfügbar sind, den Ausgangspunkt detaillierterer Systemmodellierungen (Bild 3-10). Über die Attributierung von Elementen und Relationen besteht darauf aufbauend die Möglichkeit, weitere Informationen abzubilden. VAN WIE ET AL. [2001] beispielsweise erfassen die anteiligen Montagekosten zweier Komponenten in den Zellen einer DSM. Sie verfolgen dabei unter anderem das Ziel, den Einfluss der Zahl der Schnittstellen und der Modul-Hierarchien auf die Montagekosten zu untersuchen.

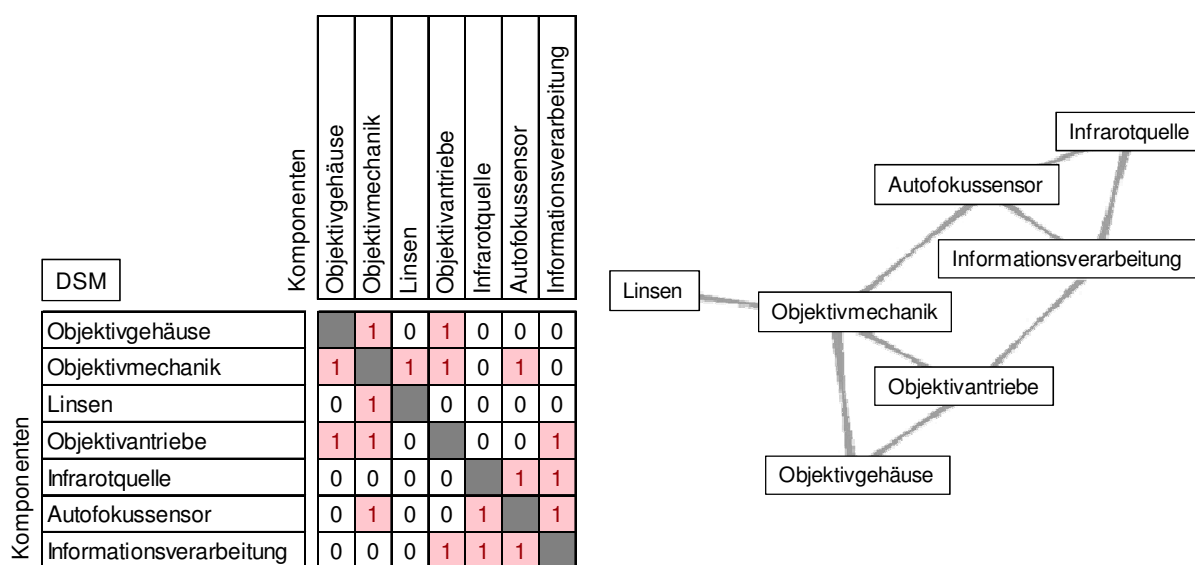


Bild 3-10: Design Structure Matrix (DSM) und stärkebasierter Graph der physikalischen Komponentenstruktur

Das Gegenstück zur DSM bildet die **Domain Mapping Matrix (DMM)** als Repräsentant der **Inter-Domain Matrizen** [DANILOVIC & BROWNING 2004]. Die DMM verknüpft folglich Elemente zweier unterschiedlicher Domänen. So können mit ihrer Hilfe beispielsweise Funktionen mit den sie realisierenden Komponenten verknüpft werden und somit eine Brücke zwischen Funktions- und Komponentenstruktur geschlagen werden (Bild 3-11, oben). Eine vergleichbar facettenreiche Unterscheidung unterschiedlicher Ausprägungen wie bei der DSM gibt es für die DMM nicht. Jedoch gibt es auch hier die Möglichkeit die Verknüpfung zweier Elemente zu quantifizieren.

So kann man aus der Zielkostenmatrix von TANAKA [1989, S.62F] herauslesen welchen prozentualen Anteil eine Baugruppe zur Erfüllung der Funktionen beiträgt mit denen sie verknüpft ist (s. a. Bild 3-18 in Kapitel 3.3.1). Diese Information verwendet Tanaka um funktionsbezogene Zielkosten in komponentenbezogene Zielkosten umzurechnen. Die direkte Verknüpfung von Elementen wie Funktionen, Komponenten und Prozessschritten über Kostenwerte in einer DMM entwickelten ZRIM ET AL. [2006] zum Zweck der Ermittlung von Funktionskosten auf Basis zuvor kalkulierter Prozess- bzw. Komponentenkosten. Ein vergleichbarer Ansatz findet sich bei VIVACE [2004].

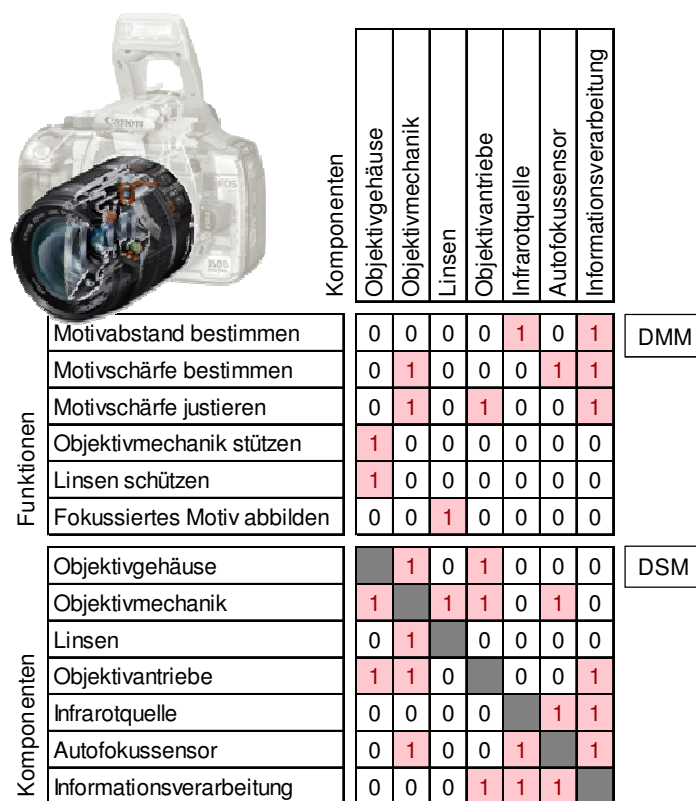


Bild 3-11: Anbindung der Funktionen an die Komponentenstruktur mittels Domain Mapping Matrix (DMM) (Bild mit freundlicher Genehmigung von Canon)

Der **kombinierte Einsatz von DSM und DMM**, also von **Intra- und Inter-Domain Matrizen**, eröffnet ein breites Feld an Einsatzmöglichkeiten. Prinzipiell ermöglicht er die Anbindung von Informationen einer anderen Domäne an die Elemente einer DSM. Vorstellbar ist hier beispielsweise die Anknüpfung von Prozessschritten an die Elemente einer Komponentenstruktur. Ein weit verbreitetes Beispiel des kombinierten Einsatzes von DSM und DMM ist das in der Methodik QFD¹³ verankerte House of Quality (HoQ) [HAUSER & CLAUSING 1988]. Hier werden beispielsweise die Kundenanforderungen mit den resultierenden technischen Anforderungen verknüpft. Die technischen Anforderungen werden einander in einer DSM gegenüber gestellt um eventuelle Konflikte bzw. begünstigende Effekte zu identifizieren. In einem weniger verbreiteten Ansatz ermitteln Dong & Whitney auf Basis einer Entwurfsmatrix [A] des Axiomatic Design (vgl. Kapitel 3.1.4) eine DSM der Design Parameter bzw. der Produktkomponenten. Das heißt sie leiten aus der Anbindung von Funktionen an Komponenten durch systematisches (und mathematisch fundiertes) Umsortieren der Zeilen und Spalten die funktionale Verknüpfung der Komponenten ab [DONG & WHITNEY 2001].

Die **Multiple-Domain Matrix (MDM)** stellt eine Erweiterung des kombinierten Einsatzes von DSM und DMM um Berechnungs- und Transformationsmethoden dar [MAURER 2007, S.60FF]. Als Beispiele konkreter Anwendungen nennt Maurer die K-&V-Matrix von BONGULIELMI ET AL. [2001], die connectivity maps von YASSINE ET AL. [2003] sowie die Arbeiten von DANILOVIC & BÖRJESSION [2001] zum Management einer Multi-Projekt Umgebung. MAURER [2007, S.72FF] selbst stellt in seiner Arbeit eine generische Beschreibung der MDM Methodik auf. Bild 3-12 zeigt die verschiedenen Bestandteile einer MDM inklusive einer Berechnungsmöglichkeit zur Ableitung einer Matrix die indirekte, berechnete Verknüpfungen zwischen Elementen darstellt.

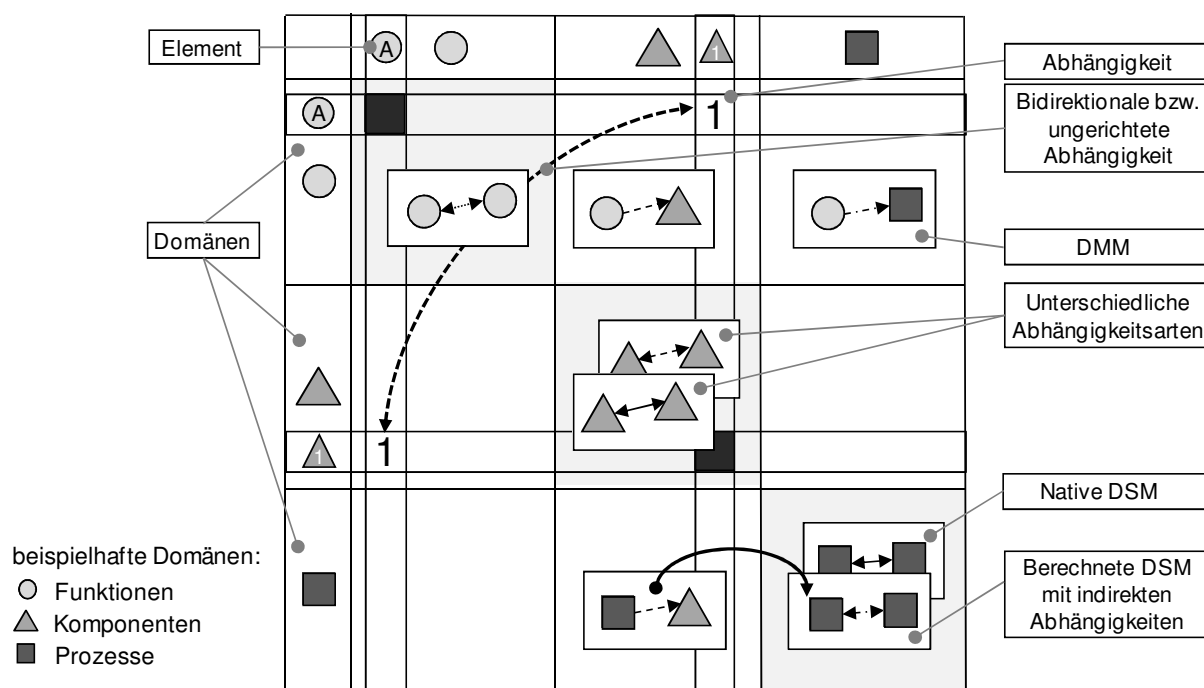


Bild 3-12: Aufbau einer Multiple-Domain Matrix [nach MAURER 2007, S.80]

¹³ Quality Function Deployment

Die Notwendigkeit der **Ableitung indirekter Abhängigkeiten** ergibt sich daraus, dass diese in der Regel durch Befragungen oder Dokumentensichtung nur schwer bzw. gar nicht zu erfassen sind. Ein Beispiel ist die Verknüpfung zweier Entwickler durch ihre Arbeit an ein und derselben Komponente. Arbeitet die eine Person zu einem deutlich früheren Zeitpunkt an der Komponente als die andere so ist es den beiden eventuell gar nicht bewusst, dass diese indirekte Beziehung zwischen ihnen besteht und eine Absprache zwischen ihnen sinnvoll wäre. Während diese Verbindung in den meisten Fällen von den Personen selbst noch konstruiert werden könnte wird dies für den folgenden Fall deutlich unwahrscheinlicher: Nun arbeiten die beiden Personen nicht an derselben Komponente, sondern an zwei unterschiedlichen, die jedoch untereinander vernetzt sind. Eine Änderung der einen Person an seiner Komponente könnte also Auswirkungen auf die von der anderen Person bearbeitete Komponente haben.

Zur rechnerischen Herleitung der die beschriebenen indirekten Abhängigkeiten abbildenden DSM stellt MAURER [2007, S.85ff] die zugrundeliegenden Matrixmultiplikationen vor. Bild 3-13 zeigt die Berechnungswege für den vereinfachten Fall ungerichteter Abhängigkeiten. Durch diese Berechnungen können unterschiedliche Sichten auf Abhängigkeitsnetze generiert werden, die dann in der Folge mit geeigneten Analysewerkzeugen untersucht werden können und somit Ansatzpunkte zur Systemoptimierung identifiziert werden können.

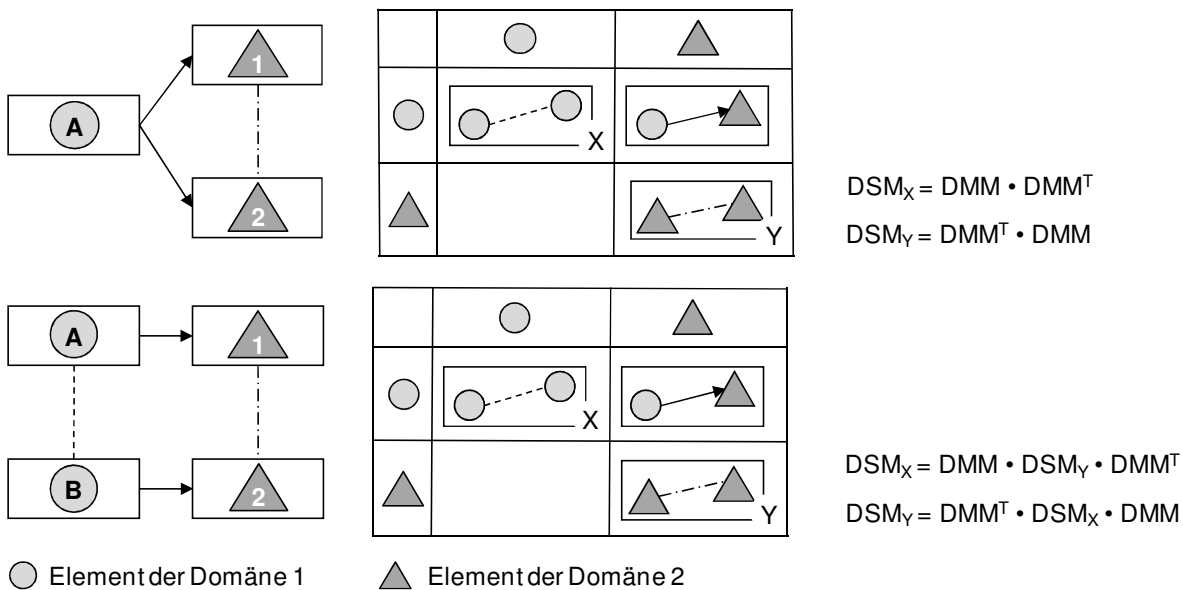


Bild 3-13: Möglichkeiten der DSM-Berechnung [nach MAURER 2007, S.113ff]

Wendet man diese Transformationsmethoden auf das Beispiel der Autofokuseinheit an, so besteht die Möglichkeit zusätzlich zur **physikalischen Komponentenstruktur**, wie sie in Bild 3-10 dargestellt ist die funktionale Komponentenstruktur zu berechnen. Die **funktionale Komponentenstruktur** drückt dabei aus, welche Komponenten aufgrund einer gemeinsamen Funktionserbringung miteinander verknüpft sind. Berechnet wird sie aus der die Verknüpfung von Komponenten und Funktionen abbildenden Domain Mapping Matrix (Bild 3-11, oben und Bild 3-14).

DMM ^T		DMM	•	DSM	=																																																																																																																																																										
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> </table>	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> </table>	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Objektivgehäuse</td><td style="padding: 2px 10px;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Objektivmechanik</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">2</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Linsen</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Objektivantriebe</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Infrarotquelle</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Autofokussensor</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">Informationsverarbeitung</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">2</td><td style="padding: 2px 10px;">0</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">1</td><td style="padding: 2px 10px; background-color: #f8d7da;">3</td></tr> </table>	Objektivgehäuse	2	0	0	0	0	0	0	Objektivmechanik	0	2	0	1	0	1	2	Linsen	0	0	1	0	0	0	0	Objektivantriebe	0	1	0	1	0	0	1	Infrarotquelle	0	0	0	0	1	0	1	Autofokussensor	0	1	0	0	0	1	1	Informationsverarbeitung	0	2	0	1	1	1	3	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Objektivgehäuse</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Objektivmechanik</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Linsen</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Objektivantriebe</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Infrarotquelle</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Autofokussensor</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Informationsverarbeitung</td><td style="border: 1px solid black; width: 20px;"></td></tr> </table>	Objektivgehäuse		Objektivmechanik		Linsen		Objektivantriebe		Infrarotquelle		Autofokussensor		Informationsverarbeitung	
0	0	0	1	1	0																																																																																																																																																										
0	1	1	0	0	0																																																																																																																																																										
0	0	0	0	0	1																																																																																																																																																										
0	0	1	0	0	0																																																																																																																																																										
1	0	0	0	0	0																																																																																																																																																										
0	1	0	0	0	0																																																																																																																																																										
1	1	1	0	0	0																																																																																																																																																										
0	0	0	0	1	0	1																																																																																																																																																									
0	1	0	0	0	1	1																																																																																																																																																									
0	1	0	1	0	0	1																																																																																																																																																									
1	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																									
1	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																									
0	0	1	0	0	0	0																																																																																																																																																									
Objektivgehäuse	2	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																								
Objektivmechanik	0	2	0	1	0	1	2																																																																																																																																																								
Linsen	0	0	1	0	0	0	0																																																																																																																																																								
Objektivantriebe	0	1	0	1	0	0	1																																																																																																																																																								
Infrarotquelle	0	0	0	0	1	0	1																																																																																																																																																								
Autofokussensor	0	1	0	0	0	1	1																																																																																																																																																								
Informationsverarbeitung	0	2	0	1	1	1	3																																																																																																																																																								
Objektivgehäuse																																																																																																																																																															
Objektivmechanik																																																																																																																																																															
Linsen																																																																																																																																																															
Objektivantriebe																																																																																																																																																															
Infrarotquelle																																																																																																																																																															
Autofokussensor																																																																																																																																																															
Informationsverarbeitung																																																																																																																																																															

Bild 3-14: Berechnung der funktionalen Komponentenstruktur aus der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten

3.2.2 Analyse und Optimierung komplexer Produkte mittels Kennzahlen und Strukturmerkmalen

In Hinblick auf die Analyse der strukturellen Komplexität bzw. die Bestimmung struktureller Charakteristika von Produkten lassen sich zahlreiche Ansätze unterscheiden. So besteht zum einen die Möglichkeit die Komplexität eines Systems in Form von Kennzahlen, die in diesem Zusammenhang oftmals Komplexitätsmetriken genannt werden, auszudrücken.

Zahlreiche der im Umfeld der Produktentwicklung eingesetzten **Komplexitätsmetriken** haben ihren Ursprung in der Softwaretechnik. Dies liegt darin begründet, dass der Ablauf bzw. die Ausführung eines Programmcodes mit dem Ablauf eines aus einzelnen Prozessbausteinen aufgebauten Produktentstehungsprozesses vergleichbar ist und somit im Bereich der Prozessbewertung erste Metriken adaptiert wurden. Die wachsende Bedeutung und Aufmerksamkeit die diesem Forschungsbereich zugetragen wird führte dazu, dass in der Zwischenzeit zahlreiche unterschiedliche Kennzahlen zur Bewertung der Prozesskomplexität auf Basis von Prozessmodellen wie EPC (Event-driven Prozess Chain) verfügbar sind [z. B. CARDOSO 2005; GRUHN ET AL. 2006; KREIMEYER ET AL. 2008; KREIMEYER 2010]. Im Zuge dieser Entwicklung wurden auch erste Kennzahlen für die Bewertung der Produktkomplexität adaptiert [BAR-YAM 2003]. Der Großteil der Komplexitätskennzahlen zur Bewertung von Produktkonzepten leitet sich vom Komplexitätsverständnis der Systemtheorie, dem Informationsgehalt und dem Unabhängigkeitsaxiom des Axiomatic Design und der Entropie von Systemen nach Boltzmann ab. Der größte Unterschied zwischen den Komplexitätsmetriken von Produkt und Prozess besteht darin, dass die Richtung der Verknüpfung einzelner Elemente, die in Hinsicht auf die Bewertung von Prozessen von großer Bedeutung ist, bei Produkten eine eher unterge-

ordnete Rolle spielt. Im Folgenden werden nun einige ausgewählte Produktkennzahlen beschrieben um einen Überblick über die Breite der existierenden Ansätze zu geben.

Das einfachste und auch das am wenigsten aussagekräftige in der Literatur zu findende Maß der Produktkomplexität bestimmt sich rein aus der Anzahl der Komponenten des betreffenden Produktes [z. B. BOHNE 1998]. Neben der Anzahl berücksichtigen gängige Definitionen der Komplexität auch die Verschiedenartigkeit der Elemente sowie die Anzahl und die Verschiedenartigkeit der sie verbindenden Relationen [PATZAK 1982, S.22FF]. Dieser Tatsache trägt der Ansatz zur Berechnung der physikalischen Komplexität nach MARTI [2007, S.120FF] Rechnung. Marti bestimmt dabei die Komplexität einzelner Produktkomponenten, die sich zum Teil aus mehreren Teilen zusammensetzen. Dabei bezieht er jedoch die Verschiedenartigkeit auf die Varianz, also die Anzahl der Varianten einer Komponente. Gleiches gilt für die die Komponenten verbindenden Schnittstellen.

Auch wenn Metriken, die die Anzahl und Verschiedenartigkeit von Komponenten und Schnittstellen berücksichtigen sich an gängigen und weithin akzeptierten Definitionen der Komplexität orientieren, so werden sie doch oftmals kritisiert, da sie die durch die Produkte zu realisierende Funktionalität vernachlässigen [z. B. BASHIR & THOMSON 2001]. Die einfachste Möglichkeit der Berücksichtigung der Funktionalität in einer Komplexitätsmetrik ist die Bestimmung der Anzahl der durch das Produkt zu realisierenden Teilfunktionen [z. B. GRIFFIN 1993, KANNAPAN 1995]. Autoren wie BASHIR & THOMSON [2001] erweitern diesen Ansatz, indem sie die Ebenen der hierarchischen Zergliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen in die Bestimmung der Produktkomplexität PC mit einbeziehen.

$$PC = \sum_{j=1}^l F_j \cdot j$$

l Anzahl der Ebenen der Funktionshierarchie

F_j Anzahl der Funktionen auf der Ebene j

Als Ergänzung zu seiner zuvor bereits beschriebenen physikalischen Komplexität quantifiziert MARTI [2007, S.114FF] auch die Funktionalität einzelner Produktkomponenten und bildet aus der Kombination beider Kennzahlen sein Komplexitätsmaß. Zur Quantifizierung der Funktionalität orientiert er sich an der Zielkostenmatrix nach TANAKA [1989, S.62F] (vgl. Bild 3-18 in Kapitel 3.3.1) und bestimmt im Wesentlichen den Beitrag einer Komponente zur Erfüllung der Gesamtfunktion über die hierarchische Zergliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen und der Anbindung von Teilfunktionen an Komponenten.

Ein weiterer Ansatz, der sowohl den Einfluss der Komponenten als auch der Funktionen auf die Produktkomplexität berücksichtigt, findet sich im Axiomatic Design [SUH 1998] (vgl. Kapitel 3.1.4). Die reale Komplexität, die Suh mit dem Informationsgehalt der Verknüpfung von Funktionsanforderungen und Entwurfsparametern gleichsetzt, ist ein Maß der Ungewissheit mit der die funktionalen Anforderungen erfüllt werden. Somit ist der Sonderfall des „uncoupled design“ bei dem jeder Funktionsanforderung genau ein Entwurfsparameter zugeordnet wird, die Lösungsalternative mit der geringsten Komplexität. Zusätzlich zur realen Komplexität berücksichtigt Suh eine imaginäre Komplexität, die den Unsicherheitsfaktor Mensch berücksichtigt und in Summe mit der realen Komplexität die absolute Komplexität ergibt.

Die Betrachtung des Informationsgehalts eines Lösungskonzeptes nach Suh bildet die Basis zahlreicher Komplexitätsmetriken. Beispiele finden sich bei EL-HAIK & YANK [1999] oder DIERNEDER & SCHEIDL [2001].

Auf vergleichbaren Metriken aufbauend bringt GUENOV [2002] die Entropie und Unordnung als weiteres Maß der Komplexität in die Betrachtung mit ein. Auf Basis der Verknüpfung von Funktionsanforderungen {FRs} und Entwurfsparametern {DPs} in Form der Entwurfsmatrix [A] erstellt er aus Formeln der Entropiebetrachtung drei unterschiedliche Komplexitätsmetriken, die er hinsichtlich ihrer Gültigkeit und Aussagekraft miteinander vergleicht (Bild 3-15). Neben Guenov entwickelten noch weitere Autoren wie z. B. CALINESCU ET. AL [2000] Komplexitätsmetriken unter Einbezug der Entropie.

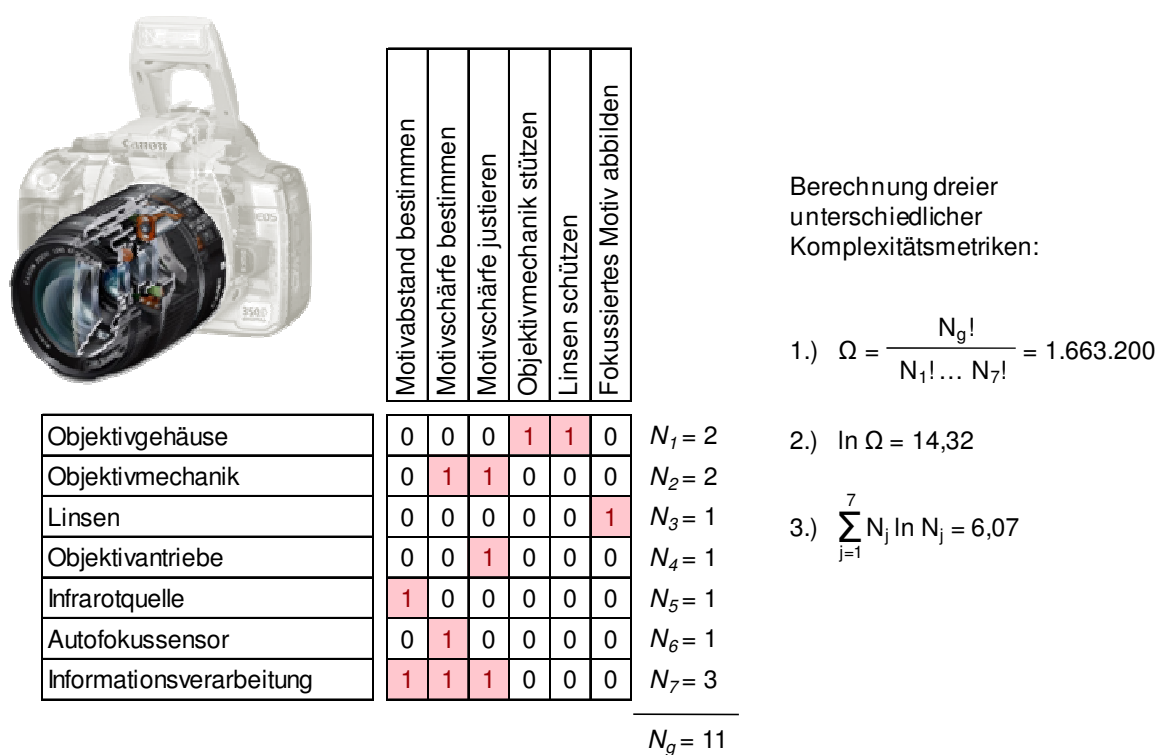


Bild 3-15: Vergleich dreier Komplexitätsmetriken nach GUENOV [2002]

Als weitere Alternative der Komplexitätsbestimmung existieren Ansätze die mittels klassifizierter Indizes die Größe und die eingesetzte Technologie aber auch das Umfeld und die Organisationsstruktur einer Produktentwicklung beschreiben und aus deren Kombination eine Komplexitätskennzahl bestimmen [COOPER ET AL. 1995; ZANG & LUO 2007].

Ein Vergleich einiger der vorgestellten und weiteren Metriken findet sich bei SUMMERS & SHAH [2003] die darauf aufbauend eine Kennzahlensammlung zur Berücksichtigung von Größe, Informationsgehalt und Realisierbarkeit ableiten.

Den vorgestellten Ansätzen gemeinsam ist, dass sie entwickelt wurden um Produkte hinsichtlich ihrer Komplexität vergleichbar zu machen. In Hinblick auf die Konzeptauswahl im Rah-

men des domänenübergreifenden Systementwurfs mechatronischer Systeme provoziert dies die Auswahl einer möglichst wenig komplexen Konzeptalternative.

Dass es nicht das Ziel des Komplexitätsmanagements ist, das am wenigsten komplexe System auszuwählen wurde bereits gezeigt. Denn nicht die Komplexität ist das Problem, sondern das oftmals fehlende Wissen zum richtigen Umgang mit ihr [LINDEMANN ET AL. 2008, S.35].

Außerdem ist die Aussagekraft von Komplexitätskennzahlen ohne Bezug zu anderen Größen wie z. B. Kosten gering einzustufen. Von den oben stehend genannten Autoren verknüpfen jedoch lediglich BASHIR & THOMSON [2001] ihre Komplexitätsmetrik mit einer weiter führenden Aussage. Die beiden bestimmen den geschätzten Entwurfsaufwand in Stunden \hat{E} auf Basis der zuvor hergeleiteten Produktkomplexität PC , sowie zweier Parameter a , b , wie folgt:

$$\hat{E} = a \cdot PC^b = a \cdot \left(\sum_{j=1}^l F_j \cdot j \right)^b$$

Neben der Bestimmung produktübergreifender Komplexitätsmetriken stellen differenzierte Strukturanalysen im Rahmen des Komplexitätsmanagements eine sinnvolle Möglichkeit der vergleichenden Beschreibung von Produktkonzepten dar. Das Vorgehen des Komplexitätsmanagements nach MAURER [2007, S.69] sieht hierfür ein konkretes Vorgehen vor. So folgt auf die Datenaufbereitung, bei der die zu analysierenden Design Structure Matrizen, auch unter Einbeziehung indirekter Anhängigkeiten, aus einer Multiple-Domain Matrix abgeleitet werden, die Strukturanalyse. Bei dieser wird nach signifikanten Konstellationen, so genannten **Strukturmerkmalen**, in der Struktur gesucht. Diese Strukturmerkmale unterscheiden sich von den zuvor beschriebenen Komplexitätsmetriken in sofern, dass sie Charakteristika eines Systems über bestimmte Muster der Anordnung von Elementen und Relationen beschreiben während Komplexitätsmetriken ein oder mehrere Charakteristika eines Systems in einem numerischen Wert zusammen fassen. Die Bedeutung eines Strukturmerkmals ist dabei abhängig von dem Kontext in dem es sich befindet und der zugeordneten Bedeutung des Gesamtsystems, in dem das Merkmal auftritt [BOARDMAN & SAUSER 2006; KORTLER ET AL. 2009].

Maurer greift bei seiner Strukturanalyse insbesondere auf Algorithmen und Strukturmerkmale der Graphentheorie zurück. Die Graphentheorie folgt den Definitionen der Systemtheorie und beschreibt Systeme die aus Elementen und ihren Relationen aufgebaut sind und stellt Algorithmen zu deren Analyse bereit [BOLLOBÁS 1990]. Dabei werden Elemente durch Knoten und Relationen durch Kanten repräsentiert. Die Graphentheorie bildet folglich die mathematische Basis zahlreicher, auch sehr grundlegender, Ansätze der DSM Analyse.

Die von Maurer genannten Strukturmerkmale lassen sich nach dem Analysegegenstand in drei Klassen untergliedern: Merkmale einzelner Elemente und Relationen, Merkmale von Teilsystemen oder Merkmale des gesamten Netzwerks (Bild 3-16). Dabei können Merkmale, die zur Analyse einzelner Elemente und Relationen bzw. Teilsysteme heran gezogen werden können, auch bei der Analyse des gesamten Netzwerks eingesetzt werden. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen in Bild 3-16 namentlich aufgeführten und klassifizierten Strukturmerkmale ist sowohl bei MAURER [2007, S.197FF] als auch bei LINDEMANN ET AL. [2008, S.201FF] zu finden. An dieser Stelle werden nur drei ausgewählte Merkmale anhand des bewährten Beispiels der digitalen Spiegelreflexkamera vorgestellt um den grundsätzlichen Charakter der Metriken darzulegen.

Knoten und Kanten	Teilsysteme	Systeme
Aktivsumme	Doppeltverbundene Komponente	Banding
Aktivität	Cluster	Clustern
Gelenkknoten	Distanz	Vernetzungsgrad
Erreichbarkeit	Rückkopplung	Distanzmatrix
Brückenkante	Hierarchie	Matrix indirekter Abhängigkeiten
Bus	Umgebung	Triangularisierung
Nähe	Pfad	
Kritikalität	Menge indirekter Abhängigkeiten	
Endknoten	Ähnlichkeit	
Isolierter Knoten	Spannbaum	
Blattknoten	Stark verknüpfte Teilsysteme	
Passivsumme		
Startknoten		
Transitknoten		

Bild 3-16: Strukturmerkmale zur Analyse komplexer Systeme [nach MAURER 2007]

Bild 3-17 zeigt zum einen die Berechnung des Vernetzungsgrades der vereinfachten Autofokuseinheit. Außerdem wird die besondere Stellung der Linsen in der physikalischen Komponentenstruktur deutlich. Als Blattknoten sind sie mit lediglich einem Element der restlichen Struktur verbunden. Somit sind die Linsen auch nicht Teil eines der beiden Cluster des Systems. Innerhalb eines Clusters ist jede Komponente direkt mit jeder anderen Komponente dieses Clusters verbunden.

Bei der gezeigten Form der Strukturanalyse ist zu beachten, dass die aufgeführten Charakteristika in unterschiedlichen (Arten von) Netzwerken sehr abweichende Aussagen und auch sehr verschieden starke Aussagekraft besitzen und somit ihr Einsatz einer gründlichen Vorbereitung und ein gewisses Expertenwissen bedarf. Außerdem ergibt sich eine tatsächliche Aussagekraft meist nur aus der Kombination unterschiedlicher Charakteristika [LINDEMANN ET AL. 2008, S.119].

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass sich die Strukturanalyse primär auf Intra-Domain Zusammenhänge, also auf die Analyse von DSMs, konzentriert. So findet sich bei DANILOVIC & BROWNING [2004] mit dem „DMM clustering“ zwar eine Möglichkeit der DMM Analyse, doch ansonsten wird diese in der Literatur nicht adressiert. Somit sind sowohl die Bedeutung als auch mögliche Interpretationen von DMM Analysen noch nicht komplett verifiziert. Möchte man intensiver mit DMMs arbeiten so braucht man des Weiteren eine geeignete Form der Visualisierung, wie sie für die DSM in Form von (gewichteten) Graphen bereits gefunden wurde [LINDEMANN ET AL. 2008, S.120]. Die Tendenz der bevorzugten Betrachtung von Intra-Domain Zusammenhängen findet sich auch bei den zuvor beschriebenen Komplexitätsmetriken, die zumeist aus Charakteristika der Komponenten und ihrer Relationen oder der Funktionalität abgeleitet wurden. Metriken, die beides bzw. sogar den Zusammenhang berücksichtigen konnten wie gezeigt nur wenige gefunden werden.

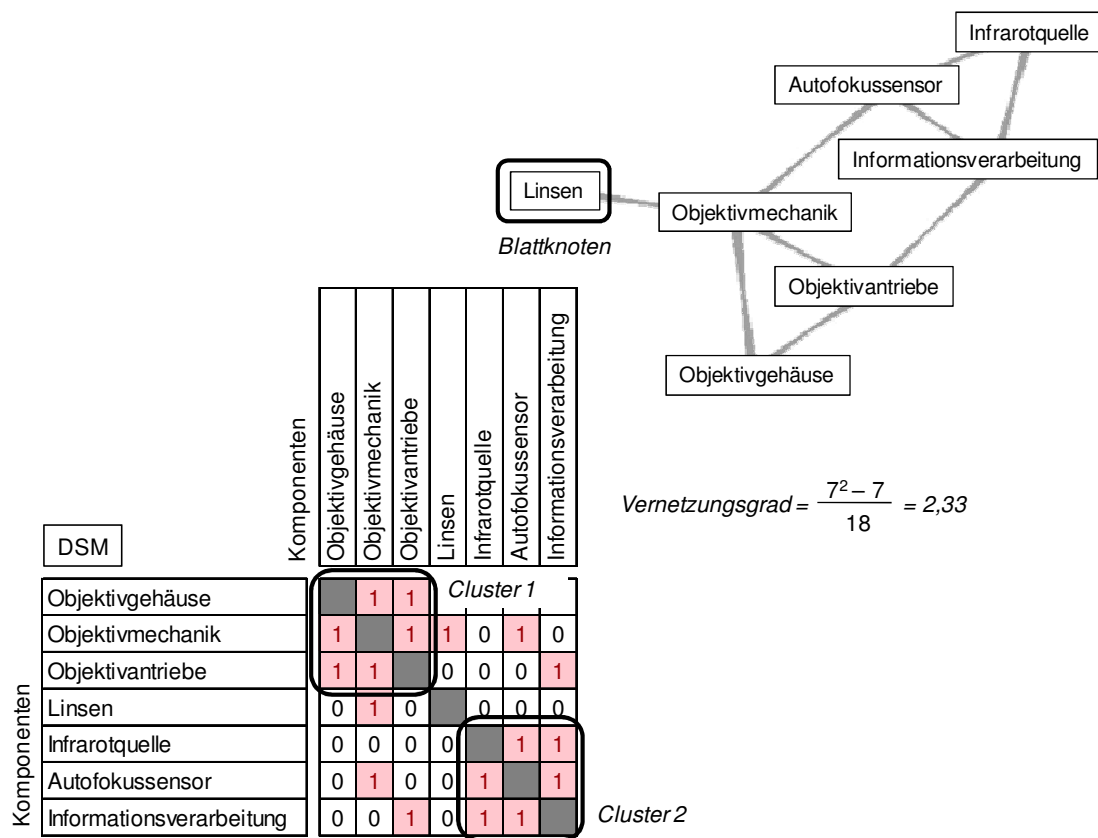


Bild 3-17: Ausprägung dreier Strukturmerkmale im Beispielsystem Autofokuseinheit

Die Strukturanalyse dient dem Bewusstsein und dem Verständnis struktureller Zusammenhänge. Ihre Ergebnisse fließen in der Folge in den Designprozess zurück um dort unter anderem die zielgerichtete Strukturverbesserung und die aktive Strukturgestaltung zu unterstützen.

Ganz konkret ermöglicht die Strukturanalyse bisher die Identifikation von Handlungsansatzpunkten zur Systemverbesserung hinsichtlich Zuverlässigkeit und Robustheit. Im Rahmen der Überarbeitung können dann Folgen resultierender Änderungen durch die Kenntnis von Abhängigkeiten viel leichter vorhergesagt werden.

Zur schrittweisen Umsetzung der Erkenntnisse der Strukturanalyse beschreibt MAURER [2007, S.136ff] zwei Möglichkeiten. Im Falle der Unterstützung der Handhabung eines komplexen bestehenden Systems, welches in seinem Grundaufbau nicht überarbeitet werden soll, schlägt er die Erstellung eines Strukturhandbuches vor. Mit dessen Hilfe können Adaptionen eines bestehenden Produktes an sich ändernde Anforderungen zielgerichteter, zuverlässiger und mit weniger Iterationen erfolgen.

Für den zweiten Fall der Unterstützung einer grundlegenden Strukturoptimierung schlägt Maurer die Anwendung des so genannten Tearing Ansatzes und der strukturellen Pareto Analyse vor. Dabei bezieht sich der Tearing Ansatz, dessen Zielsetzung es ist Relationen zu identifizieren deren Elimination zur Auflösung zahlreicher Kreisschlüsse führt, primär auf die

Optimierung von Prozessen. Die strukturelle Pareto Analyse listet Elemente nach der Häufigkeit der mit ihnen verbundenen Charakteristika. Beispielsweise auch nach der Anzahl von Kreisschlüssen in die sie eingebunden sind. Sie ermöglicht somit die Identifikation „sensibler Stellschrauben“.

3.2.3 Zusammenfassung und identifizierte Defizite

Wie gezeigt wurde, spielt in der Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs, deren Ziel es ist die grundlegende Systemstruktur zu entwerfen, die zielgerichtete Handhabung struktureller Komplexität eine entscheidende Rolle. Zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung besteht durch die Wahl einer geeigneten Partitionierung die Möglichkeit, die Kosten des Produktes positiv zu beeinflussen. Dieser, von JANSEN [2007, S.32F] als explizite Partitionierung bezeichnete, Prozess entspricht der von MAURER [2007, S.8] geforderten aktiven Strukturgestaltung. Zur Unterstützung der Strukturgestaltung existieren im Bereich des Komplexitätsmanagements sowohl Modellierungs- als auch Analyse- und Synthesemethoden.

Auf den voran gehenden Seiten wurden zunächst wesentliche Ansätze zur Modellierung komplexer mechatronischer Systeme mittels Graphen und Matrizen vorgestellt. So ermöglichen Design Structure Matrizen die Abbildung von Intra-Domain Zusammenhängen und Domain Mapping Matrizen die Abbildung von Inter-Domain Zusammenhängen. Diese beiden können miteinander kombiniert werden um komplette, mehrere Domänen umfassende Systeme abzubilden. Erweitert man diese Kombination um Berechnungs- und Transformationsmethoden, so erhält man so genannte Multiple-Domain Matrizen. Trotz dieser Vielfalt an Modellierungsansätzen bleiben einige Problemstellungen der Modellierung im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs unbehandelt. In dieser Phase entstehen zahlreiche Konzeptalternativen, die es für eine Bewertung und Auswahl nebeneinander zu stellen gilt. Dies verlangt nach einer parallelen Handhabung von Konzeptalternativen, die Unterschiede in der Systemstruktur möglichst intuitiv erkennen lässt. Über den Zeitraum der Entwicklung hinweg werden die Konzepte immer konkreter. Baugruppen werden detailliert und in Komponenten zerteilt, die in der Folge neu mit den bestehenden Komponenten des Systems zu verknüpfen sind. Um dies abzubilden, müssen die matrixbasierten Ansätze in der Lage sein, zeitliche Veränderungen der Systemstruktur zu dokumentieren.

Während bei der Beschreibung von Design Structure und Domain Mapping Matrizen einige Ansätze gezeigt wurden, die die Modellierung von Kosten ermöglichen, so ist dies für Multiple Domain Matrizen noch nicht realisiert. Hier stellt insbesondere die Erweiterung der Berechnungs- und Transformationsmethoden eine besondere Herausforderung dar. Die mathematischen Grundlagen, mittels derer z. B. die Umrechnung von Komponenten- in Funktionskosten über die Verknüpfung von Komponenten und Funktionen bewerkstelligt werden kann, existieren jedoch bereits [SCHLINK 2004, S.43FF]. Die zuvor geforderte Möglichkeit zur parallelen Handhabung von Konzeptalternativen in Kombination mit einer MDM-basierter Modellierung von Kosten würde einen direkten monetären Vergleich von Konzeptalternativen ermöglichen.

Im Anschluss an die Modellierungsmethoden wurden Metriken zur Bestimmung der Produktkomplexität vorgestellt. Dabei wurde festgestellt, dass diese Metriken in Hinblick auf die Konzeptauswahl im Rahmen des domänenübergreifenden Systementwurfs mechatronischer

Systeme lediglich die Auswahl einer möglichst wenig komplexen Konzeptalternative provozieren was jedoch nicht zwangsläufig dazu führt, dass auch das aus Kostengesichtspunkten günstigste Konzept ausgewählt wird. Somit wurde die Aussagekraft von Komplexitätskennzahlen ohne Bezug zu anderen Größen wie z. B. Kosten als sehr gering eingestuft.

Eine umfassendere Möglichkeit der vergleichenden Beschreibung von Produktkonzepten unter Berücksichtigung ihrer strukturellen Komplexität stellen Strukturanalysen mittels Algorithmen und Strukturmerkmalen der Graphentheorie dar. Bisher können hiermit Produkte z. B. hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Änderungen untersucht werden. Um die von Maurer genannten Merkmale (Bild 3-16) auf eine Strukturoptimierung unter monetären Gesichtspunkten anzuwenden, müssen sie zunächst auf ihre diesbezügliche Aussagefähigkeit und Kostenwirkung hin untersucht werden. Zusätzlich bedarf es einer Zuordnung der Merkmale zu den durch sie sinnvoll zu untersuchenden Strukturen. Zu unterscheiden sind zu diesem Zweck die Anwendung auf die physikalische Komponentenstruktur, die die physikalische Verknüpfung der Komponenten abbildet und die funktionale Komponentenstruktur, die die Verknüpfung von Komponenten aufgrund einer gemeinsamen Funktionserfüllung abbildet. Diese beiden unterscheiden sich in ihrer Ausprägung zum einen hinsichtlich des Vorhandenseins einer Gewichtung. Zum anderen kann die physikalische Komponentenstruktur im Gegensatz zur berechneten funktionalen Komponentenstruktur gerichtet sein.

Die Ergebnisse der Systemanalyse fließen im Anschluss in den Produktentwicklungsprozess zurück. Diesen Ergebnisrückfluss und die resultierende Strukturüberarbeitung gilt es ebenfalls zu unterstützen. Die bisher von Maurer vorgestellten Ansätze beziehen sich zum einen primär auf die Überarbeitung von Prozessstrukturen. Zum anderen berücksichtigen sie als einziges Merkmal Kreisschlüsse, welche jedoch für die Überarbeitung der funktionalen Komponentenstruktur aufgrund der fehlenden Richtung nicht relevant sind.

3.3 Grundlagen des Kostenmanagements in der Produktentwicklung

Vorrangiges Ziel ingenieurwissenschaftlicher Ansätze des Kostenmanagements ist es, Methoden und Instrumente für eine kostenorientierte Produktentwicklung bereit zu stellen sowie Maßnahmen zur Kostenoptimierung von Produkten aufzuzeigen [KAJÜTER 2000, S.42]. Somit umfasst das Kostenmanagement sowohl die Kostenplanung und -kontrolle als auch eine optimierende Kostensteuerung [KAJÜTER 2000, S.84 f].

Dabei sind die drei Gestaltungsobjekte des Kostenmanagements nach HORVÁTH & MÖLLER [2005, S.365] das Kostenniveau, der Kostenverlauf und die Kostenstruktur. Maßnahmen zur Beeinflussung des **Kostenniveaus** zielen dabei auf eine Reduzierung der Kosten. Neben der Beeinflussung des Kostenniveaus ist der **Kostenverlauf** in Abhängigkeit von Kosteneinflussgrößen, z. B. Beschäftigung, Lernkurveneffekte etc. ein weiterer wichtiger Gestaltungspunkt. Ein zusätzlicher Punkt, der für das Kostenmanagement von Bedeutung ist, ist die Beeinflussung der **Kostenstruktur**. Diese zielt auf die Gestaltung der relativen Zusammensetzung der Kosten in unterschiedlichen Kategorien, beispielsweise Fertigungs- und Materialkosten, variable und fixe Kosten, Einzel- und Gemeinkosten, ab [FRANZ & KAJÜTER 1997, S.9]. Im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt die Optimierung des Kostenniveaus unter Berücksichtigung ver-

schiedener Ausprägung der Kostenstruktur, die sich durch unterschiedliche Partitionierung des mechatronischen Gesamtsystems ergeben. Aufgrund seiner weiten Verbreitung in der Industrie und seiner, im Folgenden näher erläuterten, Eignung wurde das Target Costing als Rahmen des entwickelten Ansatzes gewählt.

3.3.1 Target Costing

Target Costing ist ein umfassendes Bündel aus Kostenmanagementinstrumenten zur markt-orientierten Planung, Kontrolle und Steuerung von Produktkosten in der Produktentwicklung, welches bereits in frühen Phasen zum Einsatz kommen kann [NIEMAND 1996, S.39, HORVÁTH & MÖLLER 2005, S.366]. Target Costing ist kein spezifisches Kostenrechnungsverfahren, sondern vergleichbar mit einem generischen Leitfaden, der zur Erreichung der marktorientierten Kostenziele die verschiedenen Instrumente des Kostenmanagements bündelt und die jeweiligen Einsatzzeitpunkte vorgibt [GAHR 2006, S.56F].

Target Costing wird in Deutschland oftmals als Zielkostenmanagement bezeichnet und findet hier hauptsächlich in montageintensiven Branchen mit Serienfertigung wie Maschinen- und Anlagenbau, Elektrotechnik und Automobilbau Anwendung. ARNAOUT [2001, S. 291] zeigt dazu in seiner Studie aus dem Jahr 2001 den kontinuierlichen Anstieg des Einsatzes von 1987 bis 1997. Seit Ende des letzten Jahrtausends findet man auch verstärkt Einsatzbeispiele in der Informationstechnik [BAUMÖL 1999, EBERT 1999].

SEIDENSCHWARZ [1991, S.198] unterteilt den Prozess des Target Costing in drei Phasen: die Zielkostenfindung, die Zielkostenspaltung und die Zielkostenerreichung. Zweck der **Zielkostenfindung** ist es, einen Preis für das Gesamtprodukt zu ermitteln, der abzüglich einer bestimmten Gewinnmarge und Overheadkosten (z. B. Vertriebs- und Verwaltungskosten) die Gesamtkosten für die Produkterstellung im Unternehmen festsetzt. Zur Findung der Zielkosten werden in der Literatur [SEIDENSCHWARZ 1993, BUGGERT & WIELPÜTZ 1995, GLEICH 1996, RÖSLER 1996] drei prinzipielle Wege angeführt. Es besteht die Möglichkeit, die Zielkosten vom Markt, vom Wettbewerber und aus dem Unternehmen heraus abzuleiten. Die Ableitung der Zielkosten aus dem Markt – also „**Market into Company**“ – wird als Reinform des Target Costing bezeichnet. Der am Markt erzielbare Preis („target price“) wird dabei durch Methoden der Marktforschung gewonnen [STÖBER 1999, S.19]. Im Gegensatz dazu erfolgt die Festlegung der Zielkosten „**Out of Company**“ weitestgehend ingenieursorientiert, d. h. sie erfolgt in Abhängigkeit von vorhanden technologischen Fähigkeiten, Produktionsmöglichkeiten und dem vorhandenen Erfahrungsschatz. Hilfestellung bieten Informationen von Vorgängerprodukten. Eine ähnliche Zielsetzung verfolgt die in der Literatur verbreitete Art der Zielkostenfindung „**Out of Standard Costs**“. Eine klare Abgrenzung zu Out of Company ist jedoch nicht ersichtlich [NIBL 2006, S. 36; STÖBER 1999, S. 20]. Werden die Ansätze „Market into Company“ und „Out of Company“ kombiniert, so spricht man von „**Into and Out of Company**“. Als fünfte Möglichkeit beschreibt „**Out of Competitor**“ die Zielkostenfindung durch einen Vergleich mit dem Wettbewerb, z. B. durch Benchmarking. Diese Form eignet sich für die Festlegung von Gesamtzielkosten wenn versucht werden soll, einen größeren Wettbewerbsnachteil gegenüber dem besten Konkurrenten aufzuholen [STÖBER 1999, S. 20].

Im Anschluss an die Zielkostenfindung erfolgt im Rahmen der **Zielkostenspaltung** die Aufteilung der Gesamtzielkosten auf Teilzielkosten. Mit Hilfe der Komponenten- oder der Funktionsbereichsmethode¹⁴ können die ermittelten Zielkosten auf die unterschiedlichen Produktebenen, wie Funktions-, Baugruppen- oder Bauteilebene, aufgespalten werden [GAHR 2006, S.58]. Die **Komponentenmethode** basiert auf einer Zielkostenspaltung analog zu den Ist-Kosten der Struktur von Vorgängerprodukten. Ergänzend kann man versuchen, die Aufteilung nach geschätzten Komponentenkosten der Wettbewerber vorzunehmen [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.65F]. Die **Funktionsbereichsmethode** spaltet die Zielkosten zunächst auf die Ebene von Produktfunktionen und in einem weiteren Schritt auf Baugruppen oder Bauteile auf. Dabei stellt die **Zielkostenmatrix** (Bild 3-18) die Verbindung zwischen den vom Markt geforderten Funktionen und den Produktkomponenten her indem sie angibt, welchen prozentualen Anteil eine Komponente zur Erfüllung der Funktionen beiträgt, mit denen sie verknüpft ist¹⁵. Dieser Zusammenhang zwischen Produktfunktionen und Baugruppen oder Bauteilen sollte über die komplette Entwicklung hinweg nachvollziehbar bleiben.

Die Funktionsbereichsmethode eignet sich insbesondere dann, wenn dem Kunden bereits im Vorfeld die einzelnen Funktionen des Produktes vorgelegt werden und dieser dann die Funktionen entsprechend seiner Wertschätzung bewertet. Des Weiteren ist die Funktionsbereichsmethode in Hinblick auf eine kostenoptimale Partitionierung zu bevorzugen, denn die Komponentenmethode gibt durch ihre Orientierung an einem Vorgängerprodukt zu realisierende Komponenten und somit eine Partitionierung bereits vor. Es muss also beachtet werden, dass die Zielkostenspaltung nicht innovationshemmend wirkt, d. h. die gestalterische Kreativität des Konstrukteurs und die Lösungsvielfalt einschränkt. *„In diesem Sinne ist es neben lösungsneutralen – also funktionsorientierten – Zielkosten zweckmäßig, in Phasen des Produktentwicklungsprozesses, die eine hohe Kreativität erfordern, wie z. B. der Konzeption, eine Dynamik von Teilzielkosten zu erlauben.“* [STÖBER 1999, S.76F]

Parallel zur Zielkostenspaltung beginnend und über sie hinaus erstreckt sich die Phase der **Zielkostenerreichung**¹⁶. Um die Target Costs auch tatsächlich realisieren zu können, wird der Prozess der Zielkostenerreichung durch eine Reihe von Konzepten und **Instrumenten der Entwicklungsbegleitenden Kalkulation** (Kapitel 3.3.3) und des **Kostengünstigen Konstruierens** (Kapitel 3.3.4) unterstützt, welche Kostensenkungspotentiale aufdecken und Wege zur Umsetzung dieser Potentiale in Konstruktionsalternativen aufzeigen [SEIDENSCHWARZ 1991, S. 205]. Dabei können Konstruktionsalternativen in frühen Phasen auch die Überarbeitung der Produktstruktur beinhalten, so dass dies in der Folge eine Überarbeitung der Zielkostenspaltung nach sich zieht.

Die Zielkostenerreichung strebt somit an, schon möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess, auch auf Basis geringer Informationen, Aussagen über die Einhaltung der Zielkosten zu erhalten, da dort die Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung am größten und die Kosten für Änderungen am geringsten sind. Die Ermittlung marktgerechter Zielkosten nützt wenig, wenn nicht auch der Einsatz von Instrumenten zu deren Erreichung, mit gleicher Konsequenz be-


¹⁴ Neben Funktionsbereichsmethode werden auch Begriffe wie Funktionsmethode oder – im Original – function area method [TANAKA 1989] verwendet.

¹⁵ Im Sinne des Kapitels 3.2.1 zur matrixbasierten Modellierung komplexer mechatronischer Systeme kann die Zielkostenmatrix somit als quantifizierte DMM verstanden werden.

¹⁶ Die Zielkostenerreichung wird auch Zielkostenrealisierung oder Zielkostenverfolgung genannt [SEIDENSCHWARZ 1991, S.205F].

trieben wird. Falls die Kostensenkungspotentiale in der Entwicklungsphase ausgeschöpft sind, werden in der Produktionsplanungs- und Produktionsphase weitere Kostensenkungsmaßnahmen durchgeführt.

Funktionen	Gewichtung						100 [%]
	Motivabstand bestimmen	Motivscharfe bestimmen	Motivscharfe justieren	Objektivmechanik stützen	Linse schützen	Fokussiertes Motiv abbilden	
Komponenten							
Objektivgehäuse	0	0	0	100	100	0	
Objektivmechanik	0	10	40	0	0	0	
Linse	0	0	0	0	0	100	
Objektivantriebe	0	0	40	0	0	0	
Infrarotquelle	30	0	0	0	0	0	
Autofokussensor	0	50	0	0	0	0	
Informationsverarbeitung	70	40	20	0	0	0	
	100 [%]	100 [%]	100 [%]	100 [%]	100 [%]	100 [%]	
Objektivgehäuse	0	0	0	5	10	0	15 [%]
Objektivmechanik	0	2	10	0	0	0	12 [%]
Linse	0	0	0	0	0	30	30 [%]
Objektivantriebe	0	0	10	0	0	0	10 [%]
Infrarotquelle	3	0	0	0	0	0	3 [%]
Autofokussensor	0	10	0	0	0	0	10 [%]
Informationsverarbeitung	7	8	5	0	0	0	20 [%]



... der Zielkosten entfallen auf die jeweilige Komponente

Bild 3-18: Auszug aus der Zielkostenmatrix der Autofokuseinheit zur Festlegung der prozentualen Anteile der Komponenten an den Gesamtzielkosten

Maßgebliche Erfolgsfaktoren des Target Costing sind vor allem dadurch begründet, dass bereits in sehr frühen Phasen die Notwendigkeit besteht, sich intensiv mit der aktuellen Marktsituation und der prognostizierten Marktentwicklung auseinanderzusetzen. Weiterhin werden alle am Produktentstehungsprozess beteiligten Disziplinen und Unternehmensbereiche in das Kostenmanagement eingebunden. Target Costing setzt also Zusammenarbeit, besonders von Entwicklern, Technikern der Produktion, Materialwirtschaftlern und Kostenrechnern voraus [HORVÁTH 1996, S.30]. Durch einen Einsatz in frühen Phasen der Produktentwicklung kann Target Costing den größten Beitrag zur kundenadäquaten Kostengestaltung leisten. Da jedoch

die zu Beginn der Entwicklungs- und Konzeptionsphase abgeschätzten Größen durch die ständigen Veränderungen am Markt in der Regel nicht über den gesamten Lebenszyklus Gültigkeit besitzen, ist es notwendig Preise, Zielkosten und Leistungsstandards laufend zu hinterfragen und gegebenenfalls anzupassen [SEIDENSCHWARZ (1993), S.85]. Somit wird das Kostenmanagement dynamisiert, wodurch laufend neue Einsparpotentiale erschlossen werden können.

3.3.2 Kostenrechnung der entwicklungsbegleitenden Kalkulation im Rahmen des Target Costing

Target Costing ist marktorientiertes Kostenmanagement auf Basis einer Zielkostenrechnung, das grundsätzlich unabhängig vom eingesetzten Kostenrechnungsverfahren ist [HORVÁTH 1996, S.29]. Klassisch integrierte Methoden des kostengünstigen Konstruierens und der entwicklungsbegleitenden Kalkulation wie z. B. Relativkosten, Gewichtskosten, Ähnlichkeitsgesetze, Grenzstückzahlen etc. (vgl. EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.447 FF) erfassen zumeist nur die einem Produkt direkt zuordenbaren **Material- und Fertigungseinzelkosten**.

Um den im Rahmen des Target Costing berücksichtigten Gesamtkostenanteil zu maximieren plädierte SEIDENSCHWARZ [1991B] bereits 1991 für den integrierten Einsatz der Prozesskostenrechnung, der außerdem eine erhöhte Gemeinkostentransparenz sowie eine Gemeinkostenplanung ermöglichen soll. Der Bewältigung der so genannten „Gemeinkostenproblematik“ [WESTERKÄMPER ET AL. 2001, S.158FF] ist für Produkte mit hoher Komplexität, wie bei Produkten der Einzel- und Kleinserienfertigung, eine hohe Bedeutung beizumessen [MICHAEL ET AL.1998, SEURING 2001]. Dabei ist auf eine verursachungsgerechte Zuordnung der produktnahen **Gemeinkosten** zu den Kostenträgern zu achten. Diese Forderung nach **Verursachungsgerechtigkeit** kann durch in der Praxis häufig angewandte Methoden wie die (differenzierte) Zuschlagskalkulation, bei denen die Gemeinkosten pauschal über Verteilungsmuster bzw. -schlüssel auf einzelne Kostenträger verrechnet werden, nicht erfüllt werden [COOPER & KAPLAN 1988]. Auch GAHR [2006, S.59FF] hält deshalb eine zusätzliche prozessorientierte Kostenbetrachtung bei der Zielkostenverfolgung für unerlässlich. Ein weiterer Beleg für die Notwendigkeit einer prozessorientierten Kostenbetrachtung ergibt sich auch aus der Betrachtung der im Rahmen der Studie „Kostentransparenz in der Mechatronik“ erhobenen Kostentreiber mechatronischer Produkte [BRAUN ET AL. 2007, S.45FF]. Genannt wurden hier zum größten Teil tätigkeitsbezogene Kostentreiber wie z. B. Entwicklung und Konstruktion oder Test und Inbetriebnahme.

Somit gilt es im Rahmen des Target Costing zu berücksichtigen, dass Material- und Fertigungsgemeinkosten nicht durch den Materialwert oder den Fertigungslohn bestimmt werden, sondern durch die Anzahl und Art der Prozesse, die zur Verwaltung des Materials und zur Durchführung der Fertigung notwendig sind. Der Verwaltungs- und Fertigungsaufwand wiederum hängen, ebenso wie der zuvor erwähnte Entwicklungsaufwand, stark von der Komplexität der Produkte und verknüpfter Prozesse ab. Um an dieser Stelle mehr Transparenz und

Verursachungsgerechtigkeit zu erschaffen entstand die **Prozesskostenrechnung**¹⁷ (PKR), bei der die Gemeinkosten nicht mehr über Zuschlagssätze sondern entsprechend der tatsächlichen Inanspruchnahme betrieblicher Aktivitäten oder Tätigkeiten durch die betrachteten Kalkulationsobjekte auf die Produkte verteilt werden [SEIDENSCHWARZ 1991B, COOPER & KAPLAN 1988]. Dabei ist die Prozesskostenrechnung eine **Vollkostenrechnung**, weil die gesamten Gemeinkosten auf die Kostenträger zugerechnet werden.

Bei der Prozesskostenrechnung werden zunächst die in einer Abrechnungsperiode angefallenen Kosten den entsprechenden indirekten Bereichen bzw. Kostenstellen zugeordnet. Anschließend erfolgt eine Tätigkeitsanalyse in den Kostenstellen, die zu Teilprozessen zusammengefasst werden. Im nächsten Schritt werden die hauptsächlichen Kosteneinflussfaktoren für die jeweiligen Aktivitäten bestimmt. Die Einflussfaktoren werden auch Bezugsgrößen oder Kostentreiber genannt, da sie die Höhe der Kosten einer Aktivität maßgeblich beeinflussen. Beispielhaft könnten derartige Bezugsgrößen im Einkauf die Anzahl der Bestellungen oder in der Entwicklung die Anzahl neuer Sachnummern sein. Im folgenden Schritt werden die einzelnen Teilprozesse nach gleichen Kostentriibern geordnet und zu Hauptprozessen verdichtet. Die angefallenen Kosten können nun anhand der Bezugsgröße den Kostenträgern verursachungsgerecht zugeordnet werden [GAHR 2006, S.64].

Aufgrund des Vollkostenprinzips, des entsprechend hohen Aufwandes, der vergangenheitsorientierten Kostenwerte sowie der reinen Fokussierung auf Gemeinkostenbereiche ist die PKR jedoch nur bedingt für das Kostenmanagement speziell in der Produktentwicklung geeignet [GAHR 2006, S.64].

Die **Ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung** (RPK) entwickelt die Ideen der Prozesskostenrechnung weiter und verknüpft sie mit Elementen der **Teilkostenrechnung** [EVERSHEIM 1995, SCHOLL 1998, SCHUH & SCHWENK 2001]. Dementsprechend untersucht die RPK, welche insbesondere auf eine verursachungsgerechte Bewertung von Produktvarianten ausgerichtet ist, nur variantenabhängige Unternehmensbereiche und Tätigkeiten, innerhalb derer zusätzlich zwischen varianteninduziertem und variantenneutralem Ressourcenverbrauch unterschieden wird [TANNER 1995, S.96]. Eine weitere Erweiterung im Hinblick auf die Prozesskostenrechnung besteht darin, dass die Prozessbetrachtung auch auf die direkten Unternehmensbereiche ausgeweitet wird.

Auch bei der Ermittlung der Prozesskosten bestehen signifikante Unterschiede [GAHR 2006, S.66]: Während bei der Prozesskostenrechnung versucht wird, die bereits entstandenen Kosten („**top-down**“) den Prozessen zuzuordnen und jeweils Kostentreiber zu identifizieren, werden bei der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung die Kosten der Prozesse analytisch ermittelt und die Gesamtkosten durch Aufsummierung der Prozesse bestimmt („**bottom-up**“). Hierzu wird mit Hilfe von so genannten Nomogrammen der Ressourcenverzehr (Material, Personal, EDV, Betriebsmittel, Kapital, Gebäude und Information) erfasst, der über eine Verbrauchsfunktion von einem Ressourcentreiber abhängig ist (Bild 3-19). Die Kosten eines Prozesses können anschließend über eine Kostenfunktion und den jeweiligen Ressourcenverzehr

¹⁷ Parallel zur Entwicklung der Prozesskostenrechnung entstand in den USA das **Activity Based Costing** (ABC). Im Gegensatz zur PKR, die sich auf die verursachungsgerechte Zurechnung von Kosten der indirekten Unternehmensbereichen (z. B. Entwicklung und Konstruktion, Arbeitsvorbereitung etc.) konzentriert, fokussiert ABC die verursachungsgerechte Zurechnung von Fertigungsgemeinkosten [GAISER 1998, S. 70].

ermittelt werden [SCHUH & SCHWENK 2001]. Die RPK ermöglicht somit durch die Nomogramme eine exakte und transparente Darstellung der Zusammenhänge von Kostenursache (Ressourcentreiber) und Kostenwirkung (Prozesskosten).

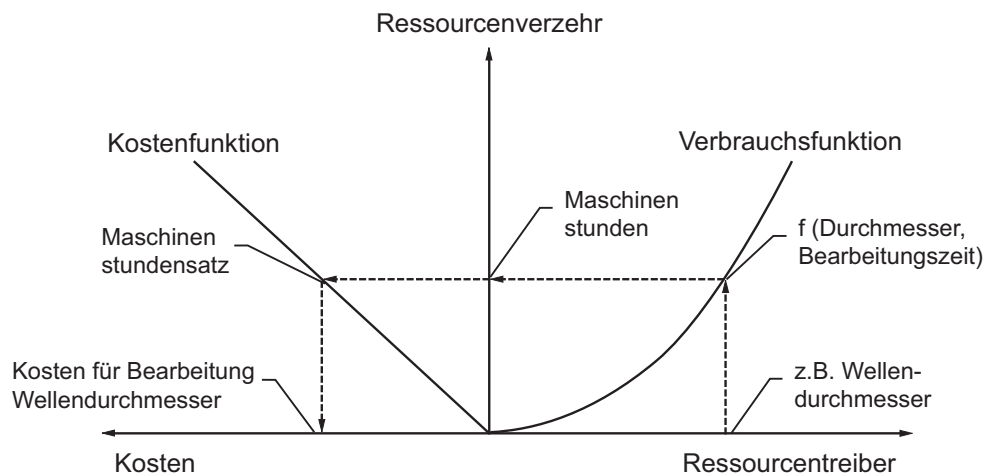


Bild 3-19: Aufbau eines Nomogramms der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung [SCHUH & SCHWENK 2001, S.152]

Der hohe Erstellungsaufwand der Nomogramme mit der Erhebung der jeweiligen Ressourcentreiber, Verbrauchs- und Kostenfunktionen ist jedoch ein Kritikpunkt der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung [EBERLE 2000, S.344]. Zudem wird die RPK durch die Festlegung der Verbrauchsfunktion unter der Prämisse konstanten Produktionsvolumens geprägt, das sich bei schwankender Beschäftigung als problematisch erweisen kann. Die RPK orientiert sich sehr stark an stabilen und standardisierten Produktionsprozessen variantenreicher Serienprodukte. Für Entwicklungsprozesse beispielsweise ist die Erstellung derartiger Nomogramme eher kritisch anzusehen [GAHR 2006, S.67]. Des Weiteren setzt die RPK detaillierte Gestaltungsdaten des zu kalkulierenden Produktes voraus, so dass sie erst in den disziplinspezifischen Ausarbeitungsphasen sinnvoll zum Einsatz kommen kann und im Vorfeld zu treffende Entscheidungen der Partitionierung und Strukturgestaltung nicht ausreichend unterstützen kann.

Mit dem Ziel, eine entwicklungsbegleitende Kalkulation nach dem Verursachungsprinzip bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung zu unterstützen entwickelte GAHR [2006, S.82FF] die so genannte **Pfadkostenrechnung**. Im Mittelpunkt steht dabei die Modellierung von Pfaden, die eine Menge von Prozessen und Aktivitäten in unterschiedlichen Unternehmensbereichen abbilden.

Mittels eines ressourcenorientierten Kostenrechnungsansatzes werden die Kosten eines Pfades und somit des Kostenträgers (z. B. Sachleistung oder Dienstleistung) berechnet. Die Pfadkostenrechnung basiert dabei auf Teilkostenbasis und wurde ursprünglich konzipiert, um die Kosten eines kundenindividuellen Auftrags (z. B. im Sondermaschinenbau, Mass Customization etc.) bereits frühzeitig in der Entwicklungsphase zu planen, zu steuern und zu kontrollieren.

Bild 3-20 zeigt das so genannte **Pfadmodell** der Pfadkostenrechnung. In vertikaler Richtung erfolgt die inhaltliche und teils zeitliche Strukturierung der Phasen, Prozesse, Sub-Prozesse oder Aktivitäten und in horizontaler Richtung können die jeweiligen Phasen, Prozesse sowie Sub-Prozesse detailliert werden. Für die Modellierung der Individualisierungspfade wird auf ein Prozessbaukastenprinzip in Anlehnung an Bichlmaier und Grunwald zurückgegriffen [BICHLMAIER 2000, GRUNWALD 2000]. Dabei wird der Individualisierungspfad aus einzelnen Elementen, den Prozessbausteinen, oder auch aus bereits vordefinierten Pfadmodulen aufgebaut. Diese Standardisierung und Modularisierung von Prozessen dient einer verbesserten Handhabung der Prozesskomplexität [SCHUH & SCHWENK 2001, S.81FF] sowie einer kontinuierlichen Konkretisierung der Individualisierungspfade in der Entwicklungsphase. Durch Rückführung der Individualisierungspfade in den Prozessbaukasten können diese für zukünftige Kundenaufträge aufwandsarm wieder verwendet werden.

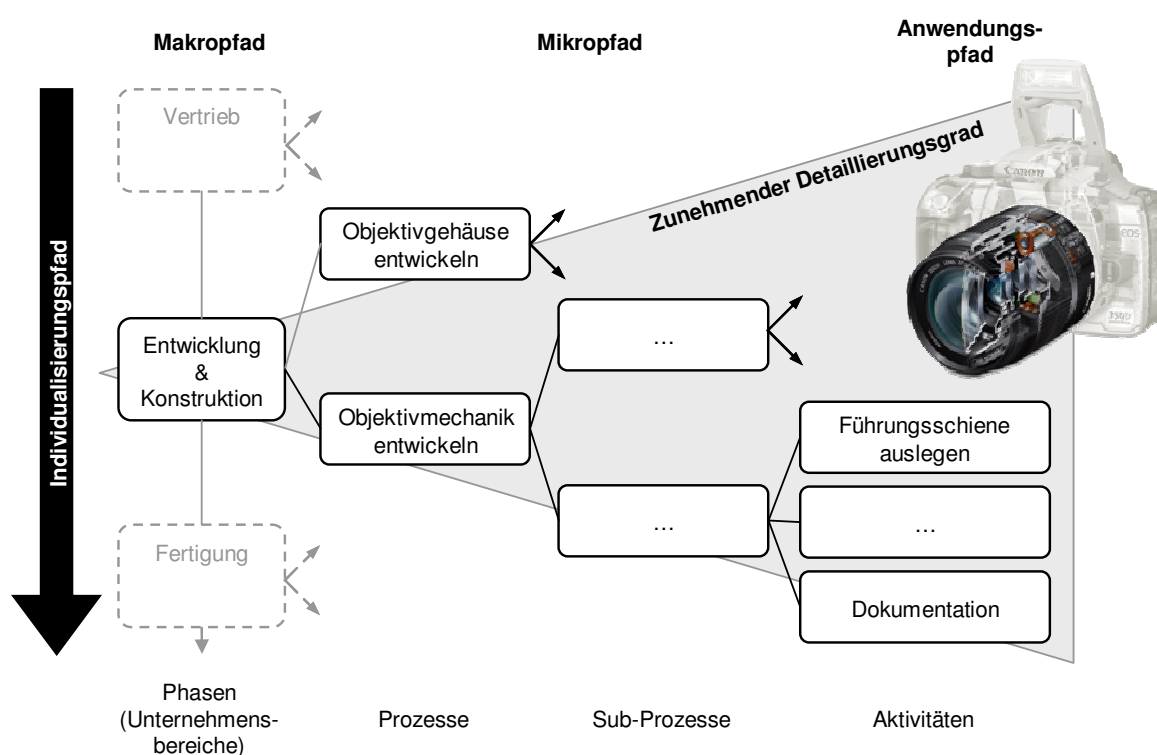


Bild 3-20: Pfadmodell der Pfadkostenrechnung [nach GAHR 2006, S.88]

Jedem Prozessbaustein sind neben allgemeinen Prozessinformationen (Name, Kurzbeschreibung, Eingangs-/Ausgangsinformationen, Methoden, Hilfsmittel, Status) detaillierte Ressourcen- und Kosteninformationen hinterlegt. Diese Informationen bilden eine wesentliche Schnittstelle zwischen dem Individualisierungspfad und dem zugrunde liegenden **Kostenmodell**¹⁸. Eine notwendige Voraussetzung für die Kostenkalkulation ist die Festlegung von einer

¹⁸ Kostenmodelle bilden nach Neff [NEFF 2002, S. 61] allgemein die Kostenstruktur eines Kostenträgers, z. B. einer Produktkomponente oder eines Prozesses, nach und ermöglichen letztendlich die Berechnung der Kosten des Kostenträgers.

oder mehreren kostentreibenden Ressourcen (z.B. Personal, Material etc.), die für die Durchführung des Prozessbausteins erforderlich sind. Basierend auf diesen Ressourcen wird der Ressourcenverzehr (z. B. Maschinenstunden) festgelegt. Da dieser in den frühen Phasen in der Regel nicht eindeutig ermittelt werden kann, wird ein Wertebereich für den Verzehr erfasst¹⁹ und über eine Drei-Punkt Schätzung ein wahrscheinlicher Näherungswert angegeben [NEFF 2002, S.137FF]. Aus dem Ressourcenverzehr und dem Kostensatz einer Ressource werden die Ressourcenkosten sowie weitere zur Kostenanalyse hilfreiche Informationen wie der Kostenanteil der einzelnen Ressourcenkosten an den Gesamtkosten, der Streubereich des Wertebereichs für den Ressourcenverzehr (Varianz) und der Kritikalitätsfaktor, der das mathematische Produkt aus Varianz und Kostenanteil repräsentiert, ermittelt. Die Prozesskosten eines Bausteins resultieren letztendlich aus der Summe der einzelnen Ressourcenkosten. Im Sinne einer entwicklungsbegleitenden Kalkulation werden die Kosten- und Ressourceninformationen in Soll- und Ist-Daten unterteilt. Die Ist-Werte werden nach erfolgter Auftragsbearbeitung zur Kostenkontrolle ergänzt. Die zusätzliche Klassifizierung der Kosteninformationen in auftragsneutral, auftrags-, losgrößen- und stückbezogen ermöglicht die korrekte Verrechnung der Prozesskosten. Die Pfadkostenrechnung ermöglicht es außerdem in besonders frühen Phasen oder für reine Zukaufteile Kosten ohne Prozessbezug zu integrieren [GAHR & LINDEMANN 2005].

Aufgrund des modularen Aufbaus des Pfadmodells und der Möglichkeit der Wiederverwendung ganzer Individualisierungspfade eignet sich die Pfadkostenrechnung nicht nur zur Kalkulation kundenindividueller Aufträge, sondern auch zum Kostenvergleich alternativer Lösungskonzepte.

3.3.3 Unterstützung der entwicklungsbegleitenden Kalkulation durch Verfahren der Kurzkalkulation

Neben unterschiedlichen Ansätzen der Kostenrechnung können im Rahmen des Target Costing auch unterschiedliche unterstützende Methoden und Werkzeuge der entwicklungsbegleitenden Kalkulation zum Einsatz kommen.

Dabei verfolgt die entwicklungsbegleitende Kalkulation zum einen das Ziel die **Kosten des ganzen Produkts während der Entwicklung**, unter Berücksichtigung der durch das gewählte Kostenrechnungsverfahren festgelegten Kostenanteile, zu **verfolgen**. Dies umfasst insbesondere eine transparente Dokumentation und Bereitstellung der während des Entwicklungsprozesses anfallenden Kostendaten. Hierbei ist nach SAUERMANN [1986, S.42FF] zu beachten, von Beginn der Entwicklung an, schon beim Festlegen der Kostenziele, die Kosten in der gleichen Struktur und Aufschlüsselung vorliegen zu haben wie später bei der Vor- und Nachkalkulation²⁰. Nur dann sind eine kontinuierliche **Kontrolle der Zielkostenerreichung** und ein Vergleich der Werte möglich. Ein Problem der entwicklungsbegleitenden Dokumentation und Bereitstellung von Kostendaten besteht darin, dass besonders in den frühen Phasen der

¹⁹ Zur Ermittlung des Wertebereichs können disziplinspezifische und -übergreifende Verfahren der Kurzkalkulation eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.3.3).

²⁰ Die Vorkalkulation erfolgt in einer späteren Phase jedoch noch vor Fertigungsbeginn auf Basis der Vorplanung des Fertigungsablaufs; die Nachkalkulation basiert auf dem tatsächlichen Ablauf der Fertigung und rechnet mit Ist-Kosten [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.419].

Produktentwicklung die zur Verfügung stehenden Kostendaten ganz unterschiedliche Qualität haben. So können für Zukaufteile, bekannte Baugruppen usw. exakt festgelegte Kosten vorliegen bzw. übernommen werden, während für neu zu entwickelnde Teile nur Schätzungen oder nur Kosten für Prototypen aber nicht die Kosten für die späteren Serienteile bekannt sind. Ferner liegen die Kosten in ganz unterschiedlicher Detaillierung vor. Für große Zukaufbaugruppen liegt nur der Einkaufspreis als Materialkosten vor. Daneben werden selbst gefertigte Kleinteile mit Material- und Fertigungskosten aufgeführt, die aber nur wenige Euro kosten. Hier muss ein vernünftiger Kompromiss im Detaillierungsgrad gefunden werden [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.450]. Voraussetzung für eine transparente und durchgängige Datenhaltung ist eine flexible Möglichkeit der Informationsaufbereitung.

Das zweite Ziel der entwicklungsbegleitenden Kalkulation ist die frühzeitige **Kalkulation einzelner Baugruppen und Teile** bzw. der zu ihrer Erstellung notwendigen Prozessschritte. Vorrangige Ziele dabei sind die Unterstützung der kontinuierlichen Kontrolle der Zielkostenerreichung, der monetäre Vergleich von Konzeptvarianten und das Erkennen von Kostensenkungspotentialen aber auch beispielsweise die Unterstützung der Angebotskalkulation und die Ermittlung von Zeitvorgaben für Arbeitsvorgänge bei der Arbeitsplanerstellung [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.451]. Aufgrund unterschiedlicher Anwendungsbereiche, fehlender Übertragbarkeit und der fortschreitenden Entwicklung vorhandener Methoden existieren zu diesem Zweck zahlreiche Kostenermittlungsverfahren verschiedener Bezeichnung: Kurz-²¹, Schätz-, Schnellkalkulation, Kostenfunktion usw. [STÖBER 1999, S.36FF; EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.454FF]. Die genannten Bezeichnungen sind dabei hauptsächlich im klassischen Maschinenbau bekannt. In der Elektro- und Informationstechnik haben sich zusätzliche eigene Verfahren entwickelt, die jedoch zum Teil auf denselben Grundsätzen aufbauen. Da in der Literatur bisher keine disziplinübergreifende Zusammenstellung von Kurzkalkulationsverfahren verfügbar ist, werden im Folgenden ausgewählte Verfahren detaillierter beschrieben. Die Anwendbarkeit und Genauigkeit aller Methoden hängt von der Ermittlung (bzw. Ermittelbarkeit) kostenrelevanter Daten zum jeweiligen Entwicklungsstand ab. Die Genauigkeit der Aussagen wird dabei mit zunehmender Konkretisierung des Produkts höher [STEITZ 1992].

Über alle technischen Disziplinen der Mechatronik hinweg lassen sich die verfügbaren Kostenermittlungsverfahren in drei grundsätzlich verschiedene Klassen einteilen. Zum einen existieren **grundlegende Verfahren der Kostenermittlung** die universell und unverändert über alle Disziplinen hinweg und zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung Gültigkeit haben:

- Zur Reduzierung des Aufwands einer Kostenermittlung empfiehlt es sich eine *Unterschiedskostenkalkulation* einzusetzen. Denn unterscheiden sich eine Lösung L1 und ihre Lösungsvarianten L2, L3 nur in Teilbereichen voneinander, so unterscheiden sich auch ihre Kosten nur in diesen Teilbereichen. Folglich werden nur für die Lösung L1 die gesamten Kosten KL1 ermittelt. Für die Varianten L2, L3 usw. werden die zur Lösung L1 unterschiedlichen Kosten ΔKL_2 , ΔKL_3 usw. ermittelt [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.455].

²¹ Kurzkalkulationen sind schnell handhabbare Kalkulationsverfahren zur Kostenermittlung in sehr frühen Phasen der Produktentwicklung [SCHOLL 1998, S.31]. Dabei ist mit „kurz“ nicht der Zeitaufwand zur Erstellung der Kalkulation zu verstehen, sondern die Ausführlichkeit und Verwendungszeit. [NIBL 2006, S.61]

- *Absolutkostenkataloge* verwenden Kostenangaben in „Geldeinheiten“, die auf eine Einheit bezogen werden, z. B. Stammdatensätze mit Kosteninformationen oder Preislisten für Zukaufteile [MÖLLER 2003, S.61]. Im Maschinenbau eignen sie sich beispielsweise für Normteile wie Schrauben und Wälzlager; in der Elektrotechnik findet man sie für so genannte „commercial-off-the-shelf“ (COTS). Solche einfachen Nachschlagewerke bieten den Vorteil, dass die benötigten Kostendaten ohne aufwändige Aufbereitung und Aufstellung von Gleichungen und Berechnungen eingesehen werden können [NIBL 2006, S.63]. Die Kalkulation von neu entwickelten oder konstruktiv veränderten Produktanteilen kann jedoch hierdurch nicht unterstützt werden.
- Am schnellsten zu qualitativen Kosteninformationen führt die, auch in der Industrie weit verbreitete Methode der *Kostenschätzung*. Ausschlaggebend für die Qualität der Ergebnisse ist die Schätzgenauigkeit. Diese kann erhöht werden durch unterteilendes Schätzen, Schätzung durch mehrere Experten²², vergleichendes Schätzen und der Kombination von Schätzung und genauer Kostenermittlung (EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.456). Grundsätzlich fließt in jedes, noch so formalisierte, Kalkulationsverfahren welches in frühen Phasen der Entwicklung Einsatz findet immer ein gewisser Schätzanteil ein. Es ändert sich lediglich die Größe, die geschätzt und dann in einen Kostenwert umgerechnet wird.

Eine weitere Klasse der Kostenermittlungsverfahren bilden die Verfahren der **Kurzkalkulation mit einer Einflussgröße**. Oft bestimmt eine einzige Größe einen Produktanteil so weitgehend, dass man diese auch zur Kostenermittlung heranziehen kann. Damit ist das resultierende Verfahren sehr einfach; führt aber nur zu akzeptablen Ergebnissen, wenn das neue Produkt konstruktiv und fertigungstechnisch den Vergleichsprodukten sehr ähnlich ist [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.459]. Basis der Verfahren dieser Klasse ist in der Regel eine Regressionsanalyse auf Basis vorangegangener Entwicklungen. In den unterschiedlichen Disziplinen lassen sich unterschiedliche Beispiele finden, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch näher benannt werden.

Die dritte und letzte Klasse umfasst die Verfahren der **Kurzkalkulation mit mehreren Einflussgrößen**. Auch hier ist die Basis oftmals eine vergangenheitsorientierte Regressionsanalyse. Es gibt jedoch auch Verfahren die mit Klassifizierungssystemen oder Soft-Computing-Techniken wie Neuronalen Netzen oder der Fuzzy-Logik arbeiten. Die unterschiedlichen Disziplinen haben auch auf diesem Feld unterschiedliche Verfahren entwickelt die im Folgenden beispielhaft vorgestellt werden sollen.

Kurzkalkulationsverfahren des Maschinenbaus

Kurzkalkulationsverfahren des Maschinenbaus berücksichtigen hauptsächlich *Material- und Fertigungskosten*. In einigen speziellen Fällen werden die Fertigungskosten noch untergliedert in *Rüst- und Bearbeitungskosten* einzelner Fertigungsverfahren.

²² In der Literatur auch oftmals als Expertenbefragung oder in der englischsprachigen Literatur als expert judgement referenziert [JØRGENSEN & SHEPPERD 2007].

- Die *Gewichts- und Materialkostenmethoden* stellen einfache Kurzkalkulationsformeln dar, bei denen die Produktkosten nur durch eine einzige Kostenfunktion pauschal prognostiziert werden. Bei der Gewichtskostenmethode wird ein konstanter Kostensatz HK_g in Abhängigkeit des Bauteilgewichts G_i angenommen, bei der Materialkostenmethode ein konstantes Verhältnis von Material- zu Fertigungskosten MK_0/HK_0 [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.460F].

$$\text{Gewichtskostenmethode: } HK_i = HK_0 \cdot \frac{G_i}{G_0} = G_i \cdot HK_g$$

$$\text{Materialkostenmethode: } HK_i = \frac{MK_i}{MK_0} \cdot HK_0$$

- Statt des Gewichts oder des Materials können für ganze Produkte, wie Verdichter, Mühlen, Filter oder Trockner, die Herstellkosten auch von *leistungsbestimmenden Größen*, wie dem Leistungsbedarf, der Ansaugleistung, der Filterfläche oder der Trocknerfläche, abhängen. Man trägt die Kosten über dieser Größe grafisch auf. Die sich ergebenden Kurven sind bei geeignetem Maßstab, z. B. doppellogarithmisch, oft Geraden. Daraus können die Kosten für andere Leistungsdaten abgelesen werden [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.461F].
- Zur Abschätzung der Kosten einzelner Fertigungsschritte besteht die Möglichkeit so genannte *Standardzeiten der Fertigung* einzusetzen. Diese sind in unternehmensspezifischen Katalogen zu dokumentieren.
- Unter einem *Kostenwachstumsgesetz* (auch Ähnlichkeitsgesetz oder -beziehung) versteht man die Beziehung der Kosten von einander ähnlichen Produkten. Geometrisch ähnliche Produkte unterscheiden sich dabei bei gleichen Proportionen nur durch einen so genannten Stufensprung (Längenmaßstab, Vergrößerungsfaktor):

$$\varphi_L = \frac{\text{Länge}_i}{\text{Länge}_0} = \frac{L_i}{L_0}$$

Auch im Falle einer geometrischen Halbähnlichkeit bei der sich bestimmte Maße mit jeweils unterschiedlichen Stufensprüngen verändern, können Kostenwachstumsgesetze als Funktion zweier Stufensprünge aufgestellt werden. Summarische Kostenwachstumsgesetze von Bauteilen (Gruppen, Maschinen) stellen die Kosten für diese direkt dar, ohne auf einzelne Fertigungsoperationen einzugehen. Da ihre Genauigkeit begrenzt ist, werden sie eingesetzt, um bei Baureihen wesentliche Kostenabhängigkeiten zu erkennen und Regeln abzuleiten [PAHL & RIEG 1984, S.40FF].

$$HK_{in} = \frac{FKr_{0i}}{n} \cdot \varphi_L^{0,5} + FKe_0 \cdot \varphi_L^2 + MK_0 \cdot \varphi_L^3; \quad \text{Stückzahl } n$$

Differenzierte Kostenwachstumsgesetze erfassen hingegen die Wachstumsgesetze der Fertigungszeiten für die an einem Bauteil angewandten Fertigungsverfahren einzeln [PAHL & RIEG 1984, S.43FF].

- Bei einigen wenigen Produkten (Rohrleitungen, Behälter, Federn ...) kann man direkt die Formeln zu ihrer Auslegung mit Formeln zur Berechnung ihrer Kosten verknüpfen. Ziel der entstehenden *Bemessungsgleichungen* ist es, sowohl die Kosten als auch die technischen Parameter durch mathematisch ähnliche Variablen zu beschreiben. Durch deren Integration in ein Gleichungssystem wird ein mathematischer Zusammenhang von technischen Beanspruchungsgleichungen zu Fertigungs- und Materialkosten hergestellt [SCHOLL 1998, S.32; VDI 1997B]. Hier sei das Beispiel der Bemessungsgleichung eines Biegeträgers aus der VDI Richtlinie 2225 [VDI 1997B] gezeigt:

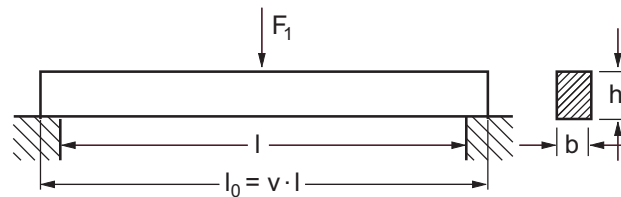


Bild 3-21: Biegebalken

$$MK = \frac{6F_1 l}{z_1 h^2 \sigma} v l h k_v (1 + \bar{g}_w) \text{ mit}$$

z_1	Faktor
σ	zulässige Biegespannung
k_v	spezifische Werkstoffkosten
$1 + \bar{g}_w$	Werkstoffgemeinkostenzuschlag

- Wo es nicht möglich ist Bemessungsgleichungen aufzustellen besteht die Möglichkeit durch mathematisch-statistische Methoden wie *Regressions- oder Optimierungsverfahren* vermutete ursächliche Zusammenhänge zwischen Kosteneinflussgrößen (metrisch messbare, unabhängige Variablen) und den Kostenwerten (metrisch messbare, abhängige Variablen) zu überprüfen und quantitativ abzuschätzen [SCHOLL 1998, S.33]. Basierend auf historischen Daten (z. B. Zeichnungen, Arbeitspläne mit Zeiten bzw. Kosten) werden somit Regressionsformeln ermittelt, die beispielsweise zur Kostenprognose oder Bearbeitungszeitprognose verwendet werden können. Man unterscheidet zwischen dem additiven und dem multiplikativen Ansatz die jeweils die Zielgröße Y aus den Einflussgrößen X_{1-n} bestimmen:

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_n \cdot X_n$$

$$Y = a \cdot X_1^{e1} \cdot X_2^{e2} \cdot \dots \cdot X_n^{en}$$

- Ein vielschichtiges Verfahren zur Kostenermittlung auf Basis von Regressionsanalysen ist das von LIET AL. [1993] vorgestellte *function costing*. Sie betrachten dabei die Realisierung einer Funktion, wie zum Beispiel dem linearen Antrieb durch einen Motor, durch unterschiedliche Lösungsalternativen und verknüpft diese über Parameter wie Kraft und Distanz mit Kostenwerten (Bild 3-22).

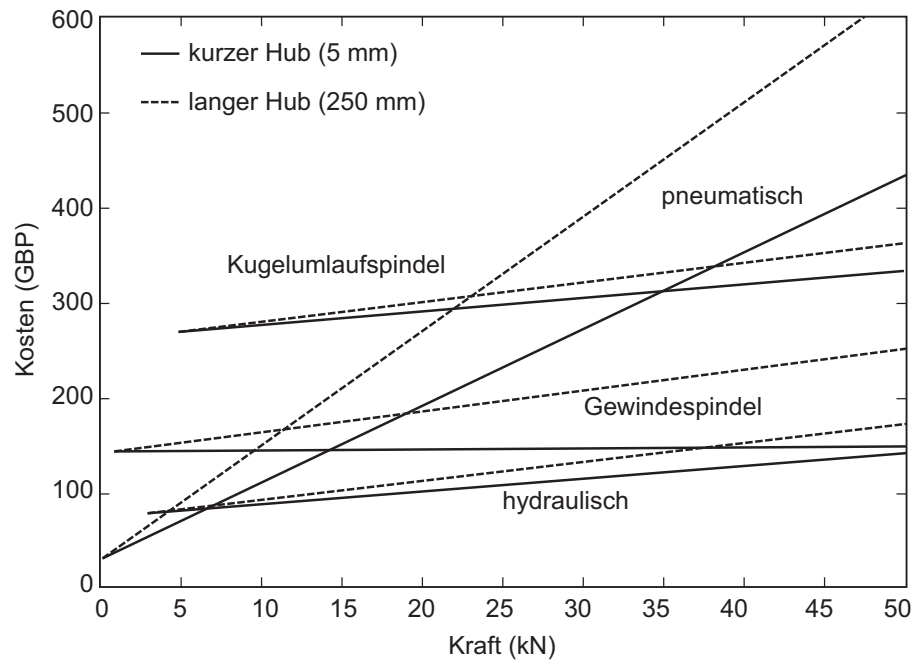


Bild 3-22: Beispielhafte Anwendung des Function Costing [LI ET AL. 1993]

- Bei der *Such- oder Ähnlichkeitskalkulation* wird über ein Suchverfahren aus einer Menge nach Merkmalen strukturierter Bauteile ein dem zu kalkulierenden Bauteil ähnliches Bauteil ermittelt. Je nach Verfahren können die Istkosten des Bauteils übernommen werden, das am ähnlichsten ist, oder die Kosten mehrerer ähnlicher Bauteile interpoliert werden [PICKEL 1989] (Bild 3-23).

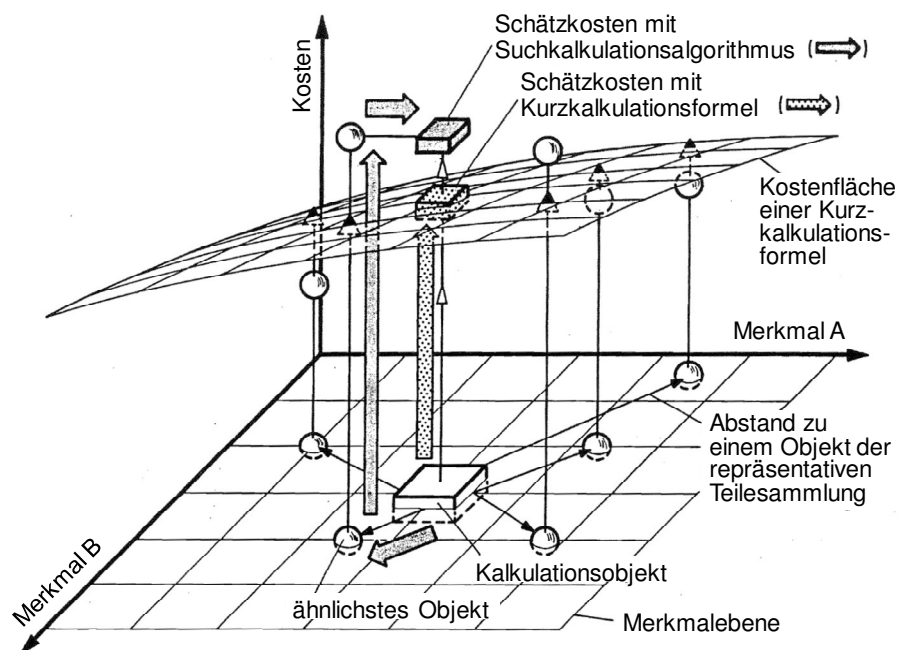


Bild 3-23: Prinzip der Such- bzw. Ähnlichkeitskalkulation [PICKEL 1989]

- Verfahren zur frühzeitigen Ermittlung von Kosten mittels neuronaler Netze entsprechen prinzipiell ebenfalls einer Ähnlichkeitssuche [BECKER 1997, S.188]. Die Aufgabe eines neuronalen Netzwerks ist es, mit einer gegebenen Zahl von Eingangsdaten (z. B. Bauteildurchmesser, -gewicht etc.) gewünschte Ausgangsdaten (z. B. Fertigungskosten, Materialkosten etc.) zu ermitteln [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.468F]. Hierfür sind Informationen über bereits erstellte Produkte aus der Vergangenheit mit nachkalkulierten Kosten erforderlich. Mithilfe dieser Werte wird das neuronale Netz trainiert, indem Transformationsfunktionen der Neuronen ermittelt, Verknüpfungen zwischen den Neuronen aufgebaut und diese mit Gewichten versehen werden [BECKER 1997, S.189].
- In ENDEBROCK [2000], LEIDICH ET AL. [2001] und SCHUMANN [2001] wird der Einsatz der Fuzzy-Logik als weiteres Soft Computing Verfahren zur Kostenermittlung beschrieben. Gerade weil die Fuzzy-Logik unscharfe Informationen verarbeitet, ist sie nach Ansicht der genannten Autoren geeignet, in der Konzeptphase des Entwicklungsprozesses, in der die Informationen noch gering sind, Kosten zu ermitteln.

Kurzkalkulationsverfahren der Elektrotechnik

Die meisten elektronischen Bauelemente werden in hochpräzisen und sensiblen Fertigungsprozessen in großen Stückzahlen gefertigt. Kleinste Abweichungen in den Prozessen führen hier oftmals schon zu unbrauchbaren Ergebnissen. Somit stellen, neben den im Maschinenbau berücksichtigten *Material- und Fertigungskosten*, so genannte *Ausschusskosten (yield-loss costs)* bei elektronischen Erzeugnissen eine nicht unerhebliche Größe dar, die es bei der Kostenermittlung in frühen Phasen zu berücksichtigen gilt [SCHEFFLER 2001, S.12]. Ermittelt werden die Ausschusskosten über die Ausbeute (*yield*), die den prozentualen Anteil der fehlerfreien Teile an der gesamten, produzierten Menge angibt. Den Ausschusskosten werden in manchen Modellen auch die Folgekosten zugerechnet, die dadurch entstehen, dass ein Defekt nicht sofort entdeckt und ein fehlerhaftes Teil weiterverarbeitet oder sogar ausgeliefert wird [GIACHETTI & ARANGO 2003, S.142]. Um den Ausschuss möglichst gering zu halten werden nach besonders fehleranfälligen Fertigungsschritten bestimmte Test- oder Inspektionsschritte durchgeführt. Als Folge daraus finden auch *Testkosten* in der Herstellkostenstruktur fast aller Kostenermittlungsverfahren Berücksichtigung.

Der erläuterte Einfluss von Ausschuss- und Testkosten auf die Gesamtkosten elektronischer Produkte bzw. die Stückkosten einzelner Komponenten bringt bei einer ökonomisch beeinflussten Planung der Fertigungsabläufe häufig ein Abwägungsproblem (sog. *Trade-off*) mit sich. Einerseits wird das Ziel verfolgt, eine hohe Qualität der Produkte zu erreichen, was eine große Fertigungsausbeute und somit hohen Testaufwand und hohe Testkosten voraussetzt, zum anderen sollen jedoch Zeit eingespart und Kosten optimiert werden [SCHEFFLER ET AL. 1998, S.22]. Dieser Sachverhalt trifft selbstverständlich nicht nur auf die Herstellung elektronischer Produkte zu, bestimmt bei diesen jedoch die Planung der Fertigungsabläufe und somit auch die existierenden Kostenermittlungsverfahren in einem besonderen Maße [TRICHY ET AL. 2001, S.1108F]. Die gleichzeitige Optimierung von Kosten und Qualität unter Berücksichtigung des Einflusses von Testgenauigkeiten ist Thema vieler Modelle der Kostenschätzung in der Elektrotechnik [GIACHETTI & ARANGO 2003, S.140]. Ein weiterer wesentlicher Aspekt

vieler Kostenermittlungsverfahren der Elektrotechnik ist die Unterstützung der Hardware/Software Partitionierung, also der Entscheidung, ob einzelne Tasks durch hardware- oder softwaretechnische Strukturelemente realisiert werden.

Die Kostenrechnung in der Elektrotechnik ist insgesamt sehr prozessorientiert. Somit orientieren sich auch die meisten Verfahren der Kostenermittlung an Fertigungsschritten und den ihnen zugrunde liegenden Kostentreibern. Auf Basis eines generischen Fertigungsprozessmodells werden die Kosten einzelner Prozessschritte aufaddiert. Eines der wenigen umfassenden Werke hierzu findet sich bei TAYLOR [1985], der in diesem Zusammenhang auch die Anwendung von Standardzeiten, Zuschlagssätzen sowie einzelne Kurzkalkulationsformeln vorstellt. Allerdings unterscheiden sich zahlreiche elektrotechnische Komponenten und somit die zu ihrer Erstellung notwendigen Prozesse sehr deutlich. Aus diesem Grund entwickelte AXELSSON [2000; 2006] eine generische Architektur elektrotechnischer Systeme und ordnete jeder Komponentenklasse eigene Formeln (von ihm *invariants* genannt) zur Kostenermittlung zu. Bild 3-24 zeigt den objektorientierten Aufbau der von Axelsson entworfenen System Breakdown Structure (SBS).

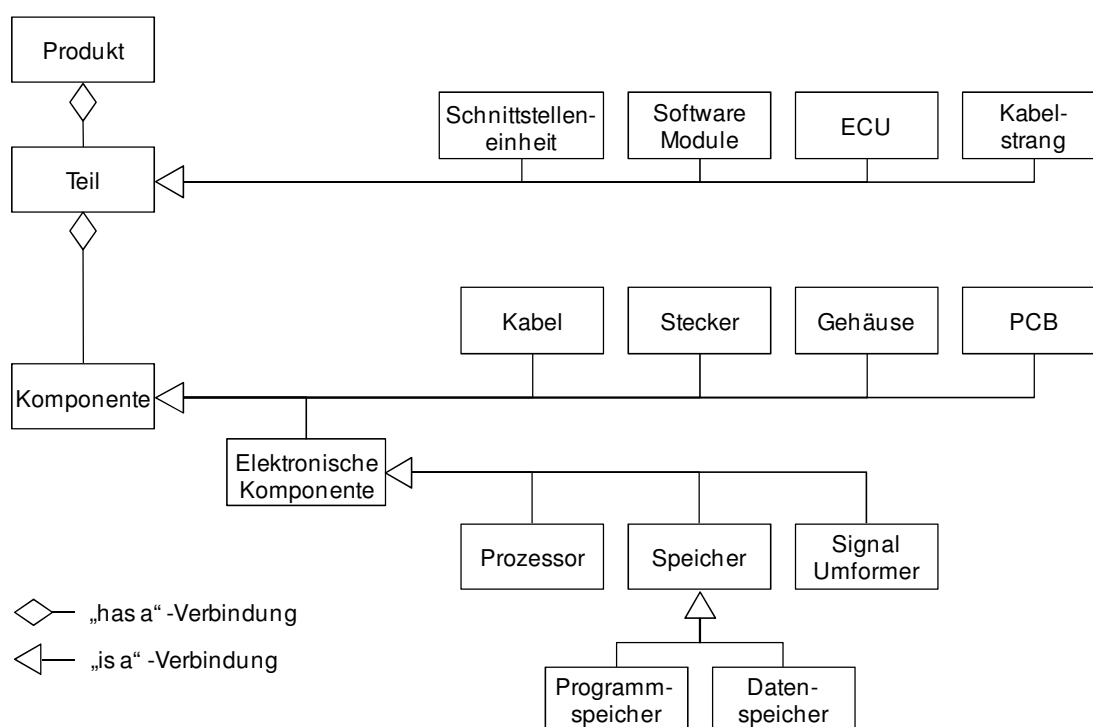


Bild 3-24: System Breakdown Structure elektrotechnischer Systeme [AXELSSON 2000]

AXELSSON [2000; 2006] bietet auf Basis seiner generischen Architektur ein Verfahren zur Kostenschätzung kompletter elektrotechnischer Funktionseinheiten bzw. Baugruppen. Weitere in der Literatur dokumentierte Verfahren der Kostenermittlung konzentrieren sich nahezu ausschließlich auf die Fertigung von Printed Circuit Boards (PCB) und ihre Bestückung mit den entsprechenden Elektronischen Komponenten. Die weiteren Elemente einer elektronischen Kontrolleinheit (ECU) wie Gehäuse und Stecker als auch die die ECUs verbindenden

Kabelbäume mit den zugehörigen Kabeln und Steckern werden nicht explizit in eigenen Ansätzen berücksichtigt. Auch die bei Axelsson als Schnittstelleneinheiten bezeichneten Sensoren und Aktoren, die primär als *commercial off-the-shelf* (COTS) zugekauft werden, finden keine weitere Berücksichtigung in Veröffentlichungen zur Kostenermittlung in der Elektrotechnik. Einzelne Ansätze steigen jedoch tiefer in die Kostenermittlung der auf dem PCB verbauten elektronischen Komponenten (insb. Prozessoren) ein. In der Folge soll nun ein kurzer Überblick über grundsätzlich verschiedene Verfahren der Kostenermittlung in der Elektrotechnik gegeben werden.

- Wie das Gewicht bei einigen Anwendungen im Maschinenbau, so wird bei der Kostenermittlung von PCBs oftmals die *board area* (Grundfläche) als primäre Einflussgröße auf die Kosten berücksichtigt [GIACHETTI & ARANGO 2003, S.146FF; AXELSSON 2000; TAYLOR 1985, S.62FF].
- Ein weiterer Kosteneinflussfaktor der PCB Herstellung welcher oftmals isoliert aber auch öfter im Zusammenhang mit der *board area* verwendet wird ist die *connectivity/wiring density* (Verbindungsichte) [RAO ET AL. 1994].
- Ausgehend von einer Funktionsbeschreibung einer ECU und der zu ihrer Realisierung notwendigen elektronischen Funktionsbausteine schätzt TAYLOR [1985, S. 56FF] die Zahl der benötigten aktiven Komponenten (Transistoren, Integrated Circuits ICs). Die notwendigen passiven Komponenten sowie weitere Komponenten wie Gehäuse werden dann über Multiplikation mit Erfahrungsparametern bestimmt und anschließend ebenfalls über Tabellen in Kosten übersetzt. Taylor nennt dieses Vorgehen *Concept Estimating*.
- Des Weiteren arbeiten viele Modelle zur Kostenermittlung von Mikroprozessoren mit dem so genannten *gate count*. Dieser Wert gibt an, wie viele Transistorschaltungen notwendig sind, um ein bestimmtes Design umzusetzen. Er wird oft als proportionaler Wert zu den Kosten verwendet [DISLIS ET AL. 1995; KEATING 1995; CHRISTIE & STROOBANDT 2000]. Die Basis zur Ermittlung des *gate count* sind funktionale Beschreibungen wie VHDL²³ Dokumente oder Daten-Fluss-Diagramme [RAGAN ET AL. 2002].
- In Analogie zum Maschinenwesen findet man auch in der Elektrotechnik den Einsatz von *Standardzeiten der Fertigung* zur Abschätzung der Kosten einzelner Fertigungsschritte der ECU Fertigung [TAYLOR 1985, S.14FF]. Ergänzend zeigt TAYLOR die Integration von Lernkurven in die Kostenschätzung mit Standardzeiten auf Basis eines generischen Prozessmodells.
- In Hinblick auf die Berücksichtigung von mehreren Kosteneinflussgrößen bietet AXELSSON [2000; 2006], wie bereits erwähnt, den umfangreichsten Ansatz. Für jede Teile- und Komponentenklasse seiner System Breakdown Structure (Bild 3-24) bietet er auf Basis von Regressionsanalysen abgeleitete Formeln zur Kostenermittlung an. Diese von ihm *Invarianten* genannten Formeln verknüpfen die kostentreibenden Attribute der einzelnen Klassen.

²³ Very High Speed Integrated Circuit (VHSIC)-Hardware Description Language

Beispiel Stecker:

$$productCost = (startCost + pinCost \cdot numberOfPins) \cdot env$$

startCost Kosten eines imaginären 0-pin Steckers

pinCost Kosten eines Pins

env Umgebungsfaktor der ECU Position

- Auf Basis von Regressionsanalysen mit mehreren Kostentreibern gibt es zahlreiche Ansätze zur kostenmäßigen Bewertung von PCBs. Diese weisen zwar unterschiedliche Granularität auf, sind jedoch immer prozessorientiert ausgerichtet und prinzipiell gleich aufgebaut. So wird auf Basis eines generischen Fertigungsprozessmodells der produktspezifische Produktionsprozess modelliert und entsprechende Kostentreiber in Hinblick auf die zu berücksichtigenden Kostenarten in vordefinierten Formeln verrechnet [ONG & LIM 1993; ONG 1995; GIACHETTI & ARANGO 2003]. SANDBORN & MORENO [1994] beschreiben ein vergleichbares Verfahren für die Herstellung von Multichip Modulen und MCMAHON ET AL. [1992] für „*electronic assemblies*“ allgemein. Des Weiteren werden die Formeln eingesetzt um den zuvor beschriebenen *Trade-Off* zu bestimmen und Entscheidungen hinsichtlich der Hardware/Software Partitionierung zu treffen (Bild 3-25).

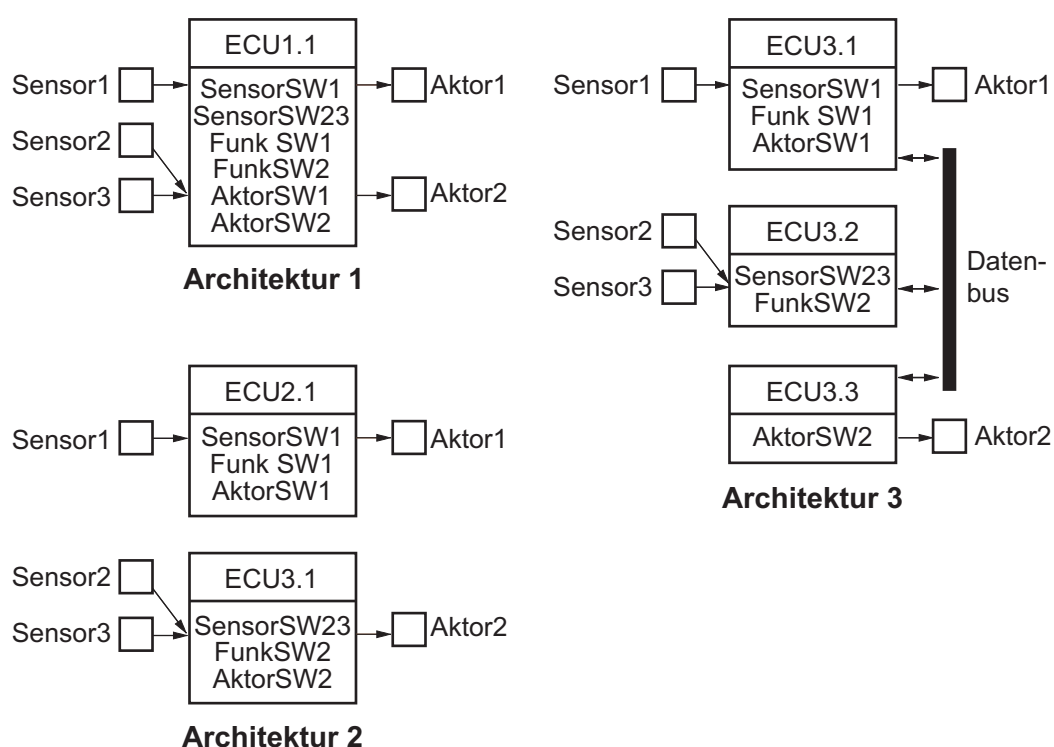


Bild 3-25: Drei Möglichkeiten der Hardware-Software-Partitionierung [AXELSSON 2006]

- Eine weitere Alternative der Kostenermittlung elektronischer Funktionseinheiten beschreiben BAKSHI & GAJSKI [1997]. Sie kategorisieren Mikroprozessoren nach gewissen Leistungsparametern und den zugehörigen Kosten in Bibliotheken und ermitteln in der Folge über eine Ähnlichkeitskalkulation (Bild 3-23) die Kosten von Neuentwicklung.

Kurzkalkulationsverfahren der Informationstechnik

Im Bereich der Informationstechnik wird zur Kostenfrüherkennung eine so genannte *Aufwandsschätzung* betrieben. Die Herstellkosten eines Softwareproduktes werden im Wesentlichen durch den personellen Aufwand (zumeist gemessen in Mitarbeiter-Monaten, MM) für Spezifikation, Entwicklung, Implementierung, Integration und Test bestimmt. Einige Ansätze berücksichtigen zusätzlich noch den Fehlerbehebungsaufwand. Das heißt, Verfahren der Kostenermittlung in der Informationstechnik berücksichtigen primär *Personalkosten*. Diese können mittels aktivitätsorientierter oder ergebnisorientierter Verfahren abgeschätzt werden [RAUSCH 2004]. Daneben findet man, ähnlich wie in der Elektrotechnik, die Verwendung von Commercial-of-the-shelf (COTS) Modulen deren Kosten direkt in Form von Absolutkosten verfügbar sind.

Im Rahmen der *aktivitätsorientierten Aufwandsschätzung* werden die benötigten Arbeitsschritte betrachtet und der jeweilige Aufwand durch empirische Schätzverfahren ermittelt. Das gängigste Beispiel eines solchen Verfahrens ist die *Prozentsatzmethode*. Mit ihr wird ausgehend vom ermittelten Aufwand der Spezifikationsphase der Aufwand für die folgenden Phasen über ein prozentuales Verteilungsschema bestimmt [PINK ET AL. 2002] (Bild 3-26).

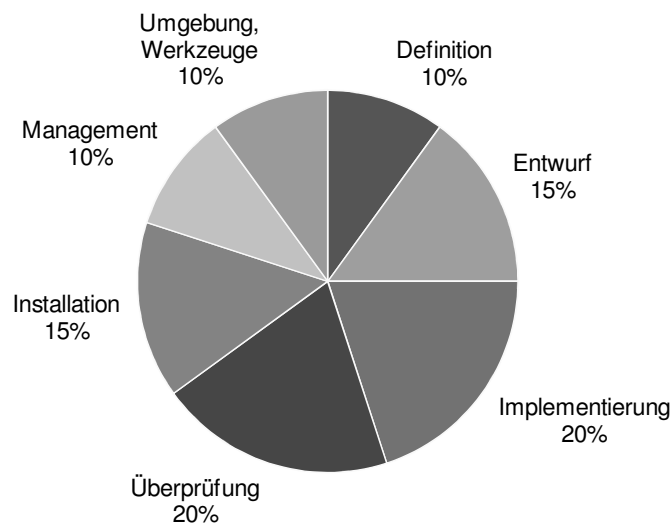


Bild 3-26: Aktivitätsorientierte Aufwandsschätzung mit der Prozentsatzmethode: Aufwandsverteilung eines „zukünftigen Softwareentwicklungsprozesses“ [STEINWEG 1999].

Die weitaus häufiger verbreiteten, und deshalb an dieser Stelle primär behandelten, Verfahren der *ergebnisorientierten Aufwandsschätzung* betrachten dahingegen den zu erwartenden Umfang des Ergebnisses.

- Das häufigste Maß für den Umfang einer Software sind ihre *Lines of Code (LOC)* bzw. ihre *Kilo Delivered Source Instructions (KDSI)* – also die Anzahl ihrer Befehlszeilen bzw. Befehle. Diese fließen oft als einzige Einflussgröße in die Aufwandschätzung von Software ein [s. NOTH & KRETZSCHMAR 1984]. Im einfachsten Falle wird also der geschätzte Umfang durch einen Erfahrungswert für die Programmierproduktivität (in LOC oder KDSI) eines Mitarbeiters pro Monat geteilt. Um den Einfluss unterschiedlicher Programmiersprachen auf die Anzahl der zu erwartenden Lines of Code zu berücksichtigen gibt es spezielle Umrechnungstabellen [s. LEUNG & FAN 2002].
- Populär ist auch das Verfahren, die funktionale Größe einer Software mit Function Points (FP) zu bewerten. Function Points liefern dabei eine Maßzahl für den Systemumfang, die aus einer funktionalen Beschreibung der Anforderungen ermittelt wird. Die Modellelemente der IFPUG FPA²⁴ umfassen dabei Datenbestände (data functions) und elementare Prozesse (transactional functions) (Bild 3-27). Die Komplexität der Datenbestände und der elementaren Prozesse jeder Funktionalität werden hinsichtlich ihrer Komplexität nach vorgegebenen Richtlinien mit Function Points bewertet. Die Summe der Function Points aller Funktionalitäten ergibt die *ungewichteten Function Points uFP* der zu erstellenden Software [GARMUS & HERRON 2001; BUNDSCHUH 2005; JANTZEN 2007]. Diese werden im einfachsten Fall direkt in Mitarbeitermonate übersetzt.

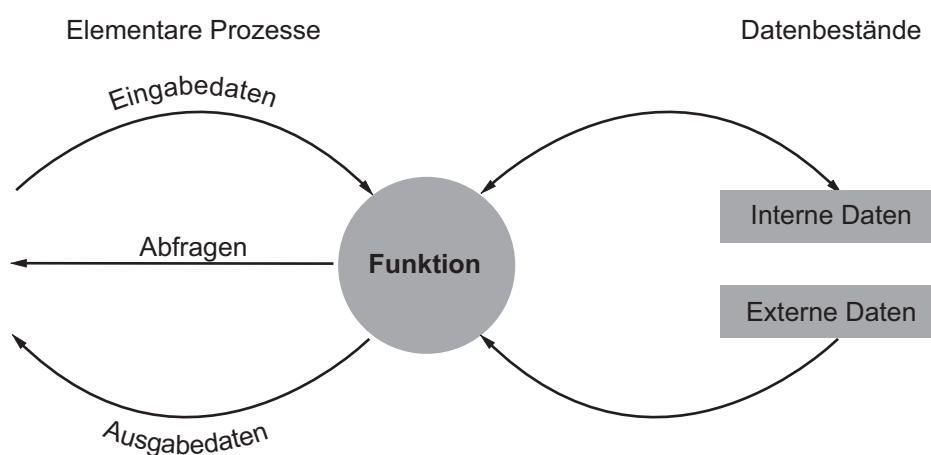


Bild 3-27: Bestandteile der Function Points

²⁴ International Function-Point User Group Function Point Analysis

- Ungewichtete Function Points können jedoch mit einem Wertfaktor (Value Adjustment Factor *VAF*) der die Einflüsse weiterer Projektcharakteristika berücksichtigt, gewichtet werden. Ergebnis sind die so genannten *gewichteten (adjusted) Function Points aFP* [GARMUS & HERRON 2001; JANTZEN 2007].

$$aFP = uFP \cdot VAF; \quad VAF \in [0,65; 1,35]$$

Um die Anwendbarkeit der FPA zu erweitern gibt es zahlreiche Weiterentwicklungen und Adaptionen wie beispielsweise COSMIC-FFP²⁵ [STAMBOLLIAN & ABRAN 2006; VOGELZANG 2006] oder Use-Case-Points [CLEMMONS 2006].

- Die *Object-Point-Methode* berücksichtigt schließlich die Modellausrichtungen hinsichtlich der Objekte, der Kommunikation und der Prozesse [SNEED 1994]. Die objektbezogene Bewertung in Form von *Class Points CP* ist dabei eine gewichtete Summe der Attribute- *A*, Relationen- *R* und Methodenanzahlen *M*.

$$CP = (A + R \cdot 2 + M \cdot 3) \cdot W$$

W Wiederverwendungsrate

Die kommunikationsbezogenen *Message Points* ergeben sich vergleichbar aus der gewichteten Summe der Daten-, Quellen- und Zieleanzahlen. Die *Process Points* berücksichtigen schließlich die Transaktionen (als dynamische Bewertung der objektorientierten Systemspezifikation). Die gewichtete Zusammenfassung dieser Kennzahlen gibt die Grundlage für die Aufwandsschätzung in Mitarbeitermonaten gemäß einer vorgegebenen Tabelle.

- Neben der Aufwandsschätzung über den erwarteten Umfang der zu erstellenden Software gibt es einzelne Ansätze, die Faktoren wie die Vererbungstiefe [PRECHELT ET AL. 2003] oder die Dichte der Verknüpfung von Programmklassen [BRIAND & WÜST 2001] als Basis für die Kostenschätzung einsetzen. Der mathematische Zusammenhang zwischen der Ausprägung des untersuchten Merkmals und den zu erwartenden Kosten wird in all diesen Fällen mittels Regression bestimmt.
- Das am weitesten verbreitete Verfahren der Software-Aufwandsschätzung auf Basis von Regressionsanalysen mit zahlreichen Einflussfaktoren ist das Constructive Cost Model *COCOMO II*²⁶ [BOEHM ET AL. 2000]. *COCOMO II* ist im Grunde genommen nicht nur ein einzelnes Modell. Es besteht aus drei Teilmodellen, die sich bezüglich des Detaillierungsgrades von Skalenfaktoren, Aufwandsmultiplikatoren und Modellkonstanten unterscheiden und somit in unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses zum Einsatz kommen (Bild 3-28). So basiert die erste grobe Größenschätzung (*Applications Composition Model*) auf der Methode der Object Points und erfolgt mit einer einfachen Größen-/Produktivitätsformel. In der folgenden Stufe des *Early Design Models* sind bereits alle Systemanforderungen niedergeschrieben und es existiert ein erster Entwurf auf Basis funktionaler Module. Die Schätzung basiert

²⁵ Common Software Measurement International Consortium Full Function Points

²⁶ Bei *COCOMO II* handelt es sich um eine Weiterentwicklung des von Berry Boehm bereits 1981 vorgestellten *COCOMO 81* [BOEHM 1981, S.57FF]

auf Function Points welche mittels Umrechnungstabellen in KSLOC²⁷ bzw. LOC übersetzt werden. Zur Erstellung des *Post-Architecture Model* wurde die Systemarchitektur bereits vollständig entworfen und demzufolge kann eine genauere Bewertung erfolgen. Das Post-Architecture Model verwendet zur Feinabstimmung der Schätzung eine Vielzahl von Multiplikatoren, die u. a. die Fähigkeiten der Mitarbeiter sowie die Produkt- und Projekteigenschaften ausdrücken. Auch von COCOMO existieren zahlreiche Weiterentwicklungen wie beispielsweise REVIC [SEIBERT 2005].

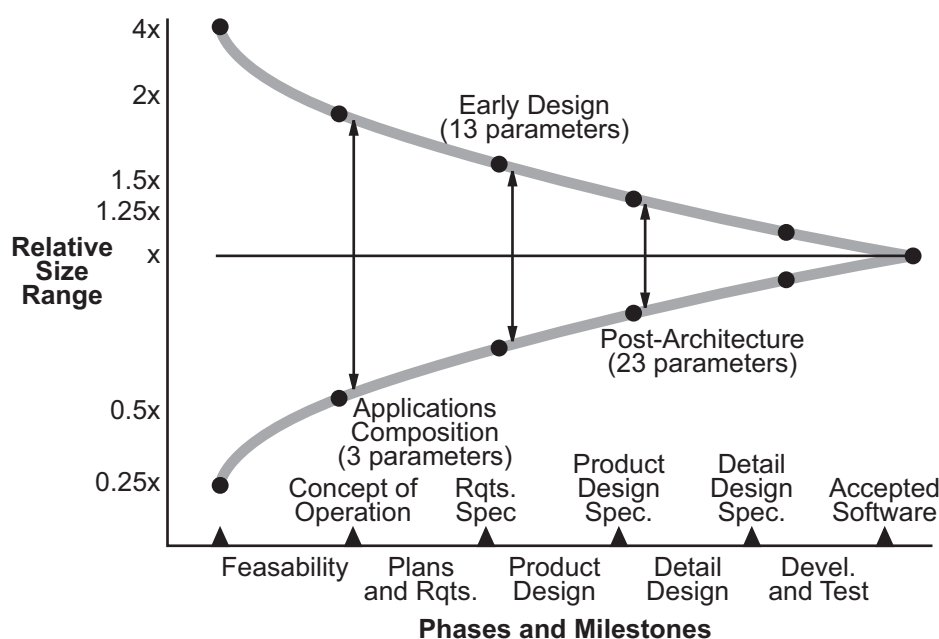


Bild 3-28: Die COCOMO II Modellphasen [BOEHM ET AL. 2000]

- Bei der *Analogie-* und der *Relationsmethode* wird der Aufwand bestimmt, indem die Neuentwicklung nach bestimmten Gesichtspunkten mit ähnlichen, bereits abgeschlossenen Projekten verglichen wird. Mögliche Kenndaten sind u. a. der Leistungsumfang aber auch zum Beispiel die Programmiererfahrung und die eingesetzte Programmiersprache sowie die Anzahl und Einigkeit der Stakeholder, die ein Interesse an den Projektergebnissen haben. Zur Unterstützung der Analogiemethode können so genannte Analogiedatenbanken erstellt werden, in denen die entsprechenden Parameter und Kosten abgeschlossener Projekte hinterlegt werden [PASSINGER ET AL. 2003, SHEPPERD & SCHOFIELD 1997]. Der einzige Unterschied zur Relationsmethode besteht darin, dass bei dieser der Vergleich der Kenndaten mit Hilfe von quantifizierten Indizes erfolgt, die eine Aufwandsanpassung für Neuentwicklungen ermöglicht. Werden also beispielsweise für eine 5-jährige Programmiererfahrung 20 Punkte weniger vergeben als für eine 3-jährige, so bedeutet die Arbeit mit einem

²⁷ Kilo Source Lines of Code

Team mit im Schnitt 3 Jahren Programmiererfahrung einen Mehraufwand von 20 Punkten im Vergleich zum Vorgängerprojekt, welches mit Programmieren durchgeführt wurde, welche durchschnittlich 5 Jahre Erfahrung aufweisen konnten.

- Die Aufwandsschätzung mittels Soft Computing Techniken wie Neuronalen Netzen und der Fuzzy Logik, wie sie bereits bei den „Kostenermittlungsverfahren des Maschinenbaus“ beschrieben wurden, sind in der Informationstechnik noch deutlich mehr verbreitet und werden hier auch ständig weiter entwickelt [JØRGENSEN & SHEPPERD 2007, IDRI ET AL. 2004].

Zur Unterstützung der Zielkostenverfolgung werden seit Anfang der 80er Jahre EDV-basierte Kosteninformationsmodelle publiziert [NIBL 2006, S.64]. Diese finden sich in unterschiedlicher Ausprägung in jeder der drei Disziplinen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf diese Ansätze nicht näher eingegangen, da sie keine neuen Verfahren der Kostenermittlung vorstellen, sondern bestehende Verfahren automatisieren und innerhalb der Disziplinengrenzen kombinieren.

3.3.4 Methodische Unterstützung des kostengünstigen Konstruierens

Nachdem eventuelle Kostenabweichungen mittels der im vorangehenden Teilkapitel dargelegten Kurzkalkulationsverfahren ermittelt wurden, gilt es nach deren Einsatz geeignete Methoden zur Unterstützung der kostenoptimierenden Konzeptüberarbeitung einzusetzen. Die hier angesprochenen Methoden werden im Maschinenwesen oftmals als qualitative Verfahren der entwicklungsbegleitenden Kalkulation bezeichnet [GAHR 2006, S.69F] und befassen sich mit der Identifikation von Überarbeitungsschwerpunkten und der Unterstützung der konzeptionellen, konstruktiven und fertigungs- bzw. implementierungstechnischen Konzeptoptimierung.

Identifikation von Überarbeitungsschwerpunkten

Eine über die Disziplinen hinweg bekannte Methode zur Ermittlung von Überarbeitungsschwerpunkten ist das Aufstellen von *Kostenstrukturen*. Kostenstrukturen verdeutlichen den Aufbau und damit die Aufteilung von Kosten nach absoluten oder relativen Anteilen. Dazu können die Kosten nach verschiedenen Kriterien, wie z. B. Herstellkosten, Baugruppen oder Fertigungsverfahren untergliedert werden. Zweck ist es, wesentliche Kostenschwerpunkte und Kostentreiber zu identifizieren [NIBL 2006, S.59F]. Eine spezielle Art der Kostenstruktur ist das Ergebnis der ABC-Analyse (Paretoanalyse) [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.81]. Hierbei werden die Elemente der Kostenstruktur so geordnet, dass drei Klassen entstehen: Klasse A hat die größten Anteile an den Kosten, Klasse B mittlere, Klasse C nur noch geringe.

Unterstützung der konzeptionellen, konstruktiven und fertigungs- bzw. implementierungstechnischen Konzeptoptimierung

Zur Konzeptoptimierung existieren in den drei Disziplinen Maschinenwesen, Elektrotechnik und Informationstechnik zahlreiche Ansätze, die jedoch oftmals nur indirekte Kostenwirkung haben. Einige dieser Ansätze sind unter dem Begriff „Design for/to X“ zusammengefasst

[LINDEMANN 2007]. So existieren im **Maschinenwesen** *Gestaltungsrichtlinien* nicht nur zum *Design to Cost* allgemein, sondern beispielsweise auch spezialisiert auf *Design for Manufacturing* oder *Design for Assembly* [PONN & LINDEMANN, S.26, BOOTHROYD ET AL. 2008].

Design to Cost Richtlinien beziehen sich ganz allgemein auf die Kostenwirkung des Konzepts, der Gestalt und der Stückzahl. Üblich ist eine Darstellung durch Bilder oder *Gut-Schlecht-Beispiele* (Bild 3-29), aber auch eine schriftliche Formulierung, z. B. in Form von *Checklisten*, ist möglich [STÖBER 1999, S.36F, FISCHER 1983]. Außerdem ermöglichen es *Relativkostenkataloge* verschiedene Lösungsmöglichkeiten für bestimmte technisch gleichwertige Lösungsvarianten anhand von Verhältniszahlen kostenmäßig zu bewerten. Zu Grunde gelegt werden dabei die Kosten von bereits vorhandenen Produkten [MÄNNEL 1997, S.161 FF.].

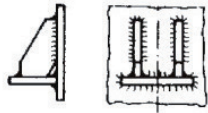
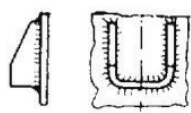


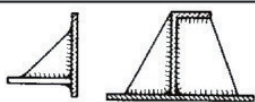
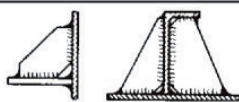
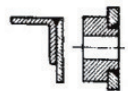
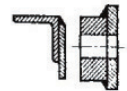
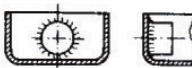
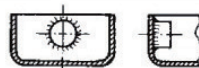
Gestaltungsregel	schlechter	besser
2. Geringe Fertigungskosten		
Bei Bezug von auswärts möglichst klein und leicht konstruieren. Wenig Wandstärke durch mehr Rippen und Teile.		
Bei Eigenfertigung und kleineren oder mittleren Schweißgruppen auf geringe Teilezahl und Schweißnahtvolumen achten: abkanten und biegen , wenig Rippen und einfache Formen bevorzugen, auch wenn das Gewicht dadurch größer wird.		wenig Teile! 
Anstreben fertigungstechnisch günstiger Nahtformen , wenn es die Beanspruchungen zulassen (Stumpf-, Kehlnähte)		
Vermeiden von Nahtanhäufungen und -kreuzungen ; gleiche Nahtdicken anstreben		
Schweißvorbereitung möglichst einsparen (Absätze, Ansträgungen)		
Anstreben guter Zugänglichkeit der Nähte		

Bild 3-29: Beispielhafter Auszug aus einer *Design to Cost* Richtlinie für Schweißteile [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.266F]

Design for Manufacturing Richtlinien [z. B. BRALLA 1986] berücksichtigen ergänzend, dass die Gestaltung stark abhängig ist vom gewählten Fertigungsverfahren, da für jedes Fertigungsverfahren (und jeden Stückzahlbereich) die fertigungsgerechte und kostengünstigste Konstruktion anders aussieht [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.222].

Zusätzlich können *Design for Assembly* Richtlinien herangezogen werden, die Hinweise auf die montagegerechte Gestaltung von Produkten geben: Da die Zahl der Montageoperationen

direkt von der Zahl der Teile abhängt, ist eine beispielhafte Maßnahme des montagegerechten Konstruierens das Weglassen oder Zusammenfassen von Teilen (Integralbauweise). Da ferner die Nach- und Anpassbearbeitung einen großen Kostenanteil einnimmt, wird eine Produktnormung vorgeschlagen, um z. B. für kritische und immer wiederkehrende Passoperationen gestufte Passteile verwenden zu können.

Aus der kurzen Beschreibung der Richtlinien wird deutlich, dass ein fertigungs- und montagegerechtes Gestalten erst nach der Wahl des Teilefertigungs- und Montageverfahren erfolgen kann [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.223]. Stehen mehrere konkurrierende Fertigungsverfahren zur Auswahl, so geben die *Grenzstückzahlen* darüber Auskunft, bei welcher Stückzahl bzw. Losgröße welches Verfahren die geringsten Fertigungskosten verursacht [GLEICH 1996, S.80]. Grundlegende Richtlinien des *Design to Cost* können bereits im Vorfeld eingesetzt werden.

Noch grundlegender gefasst und damit zu einem noch früheren Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess einsetzbar sind so genannte *Heuristische Regeln*. Heuristische Regeln dienen dazu, Zusammenhänge zwischen zu erwartenden Kosten und verschiedenen in der Konstruktionsphase festgelegten Produktmerkmalen angeben zu können [SCHOLL 1998, S.28]. Einfache Beispiele für einprägsame und nachvollziehbare Regeln sind „Verwendung möglichst großer Toleranzen“ oder „Zahl der unterschiedlichen Teile gering halten“.

Zur Unterstützung der Auswahl und Konfiguration von Sensoren und Aktoren finden sich in der Literatur verschiedenste Methoden und Hilfsmittel [JANSEN 2007, S.64ff]. Einige dieser Arbeiten berücksichtigen dabei explizit auch Kostenaspekte. So stellt beispielsweise VAIDYA [1995] eine Vorgehensweise zur kostenminimalen Auslegung von Aktorsystemen durch die Wahl einer geeigneten Kombination aus Motor und Getriebe vor. EGBUNA & BASSON [2009] beschreiben ein vergleichbares Vorgehen für die kombinierte Auswahl von Motoren und Treibern.

Ein kostenwirksames DfX der **Elektrotechnik** ist *Design for Integration*. Dies fasst Gestaltungsrichtlinien zusammen, die Kostenreduzierungen durch eine Funktionsintegration in Anwendungsspezifischen Integrierten Schaltungen (ASIC) erzielen [RINCON ET AL. 1997]. Ein weiteres ist *Design for Automation* welches insbesondere beim Layout von Printed Circuit Boards in Hinblick auf die Bestückung mit elektronischen Komponenten Berücksichtigung findet [BOOTHROYD 2005, S.291ff]. Verwandte Ansätze betrachten das Platinenlayout nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Bestückung sondern beziehen u. a. Verbindungslängen und Layeranzahlen in eine kostenorientierte, algorithmische Optimierung mit ein [OUYANG ET AL. 2000]. Weitere *Optimierungsalgorithmen* im Bereich der Elektrotechnik beschäftigen sich mit der Unterstützung der *Hardware/Software Partitionierung*. Diese verwenden zu diesem Zweck die im vorherigen Kapitel erwähnten Kurzkalkulationsverfahren auf Basis von Regressionsanalysen. Ein weiterer Aspekt der in der Literatur verstärkt Beachtung findet ist *Design for Testability*. Hier ist es das Ziel durch ein testfreundliches Systemdesign den Zeitaufwand der durchzuführenden Tests zu minimieren und auf diese Weise Kosten zu sparen [CROUCH 1999]. In diesem Zusammenhang ist auch die oft referenzierte *Trade-off Analyse* zu sehen, bei der ebenfalls über regressionsbasierte Optimierungsalgorithmen ein Gleichgewicht zwischen Test- und Ausschusskosten gefunden wird [SCHEFFLER 2001].

Nach allgemein anerkannten Schätzungen fließen 50-80 % der Gesamtkosten im Softwarebereich in die Wartung von bereits bestehendem Code [SNEED 1991]. Um diese Kosten zu ver-

ringern werden in der **Informationstechnik** *Design- und Programmierrichtlinien* eingesetzt. Im Gegensatz zu den aus dem Maschinenwesen und der Elektrotechnik bekannten Gestaltungsrichtlinien haben diese Richtlinien der Informationstechnik immer einen präskriptiven Charakter²⁸. Sie haben zum Ziel die Lesbarkeit und die Austauschbarkeit von Quelltext zu verbessern, das systematische und planmäßige Programmieren zu fördern und die Qualität der Software zu steigern. So findet man in *Designrichtlinien* beispielsweise Vorgaben bezüglich Architektur, Darstellung, Nomenklatur, Schnittstellen (Modulkohäsion und Kopplung) sowie der Benutzung von Entwurfsmustern (Patterns) [BENDER ET AL. 2005, S.344]. *Programmierrichtlinien* sind bindende Regeln für die Implementierung. Beispiele sind Vorgaben für Code-Layout, Verwendung bestimmter Konstrukte, Kommentierung, Schachtelungstiefe von Funktionen, sowie Namensgebung. Unternehmensweite Programmierrichtlinien können durch projektspezifische ergänzt bzw. präzisiert werden [BENDER ET AL. 2005, S.345]. Mit der Verbreitung von CASE²⁹-Tools mit automatisierter Codegenerierung verlieren Programmierrichtlinien an Bedeutung und Design- bzw. Modellierungsrichtlinien treten in den Vordergrund. Im Gegensatz zu den präskriptiven Design- und Programmierrichtlinien bieten „*best-practice patterns*“ eine unverbindliche Unterstützung zur (kostenmäßigen) Konzeptoptimierung an [z. B. BECK 1996].

Wie auch in der Elektrotechnik findet *Design for Testability* häufigen Einsatz in der Informationstechnik [VRANKEN ET AL. 1996; FRIEDMAN & VOAS 1995]. Dabei zielen die meisten verfügbaren Ansätze auf die Testbarkeit des fertigen Quelltextes und somit die Reduzierung des abschließenden Testaufwands ab. Im Gegensatz dazu legt JUNGMAYR [2003] in seiner Arbeit Wert darauf, dass Testbarkeit nicht nur für das Testen von Quelltext von Bedeutung ist, sondern vielmehr schon in den frühen Phasen des Entstehungsprozesses eines Softwaresystems eine hohe Testbarkeit erreicht werden sollte. Auf diese Weise können kostenintensive Iterationsschleifen vermieden werden.

Abschließend ist zu sagen, dass alle aufgeführten Gestaltungsrichtlinien, aufgrund der Tatsache, dass sie auf Erfahrungswissen basieren, nur unter bestimmten Randbedingungen anwendbar sind und betriebsspezifisch modifiziert werden müssen [EHRENSPIEL ET AL. 2007, S.85].

3.3.5 Zusammenfassung und identifizierte Defizite

Gezeigt wurden die breite industrielle Akzeptanz und die Eignung des Target Costing als Rahmen des Kostenmanagements technischer Produkte. Die Verknüpfung von Funktions- und Komponentenkosten, wie sie im Zuge der Zielkostenspaltung erstmals stattfindet, soll an dieser Stelle nochmals genauer betrachtet werden: Denn sowohl Funktions- als auch Komponentenkosten werden durch den Verbrauch von Ressourcen verursacht. Überträgt man diese drei Aspekte auf drei miteinander vernetzte Ebenen, **Funktions-, Komponenten- und Ressourcenebene**, und ruft sich nun die Ebenen des Modells aus Bild 3-9 ins Gedächtnis, so fehlt zu dessen Vervollständigung nur noch die **Prozessebene** mit ihren Prozesskosten.

²⁸ Gestaltungsrichtlinien des Maschinenwesens und der Elektrotechnik können durchaus auch präskriptiven Charakter besitzen, wenn ihre Einhaltung durch das jeweilige Unternehmen vorgeschrieben wird.

²⁹ Computer Aided Software Engineering

Die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Prozesskosten im Rahmen des Target Costing wird durch den steigenden Anteil elektronischer und softwaretechnischer Komponenten weiter verstärkt, da in diesen Disziplinen die Kostentreiber und somit auch die existierenden Ansätze der Kostenfrüherkennung einen sehr hohen Prozessbezug haben. Als mögliches Verfahren der Kostenrechnung im Rahmen des Target Costing mechatronischer Produkte wurde die Pfadkostenrechnung vorgestellt. Sie bietet durch die hierarchische Detaillierung der Kalkulationseinheiten die Möglichkeit eines Einsatzes bereits ab sehr frühen Phasen der Produktentwicklung.

Prozesskosten sollten also als Bestandteil des Target Costing fest mit den bereits verankerten Funktions- und Komponentenkosten verknüpft werden und eine Transformation zwischen den verschiedenen Repräsentationsarten problemlos gewährleisten sein.

Im Rahmen des Target Costing erfolgt eine entwicklungsbegleitende Kalkulation zur Sicherstellung der Zielkostenerreichung. In den einzelnen Disziplinen existieren zahlreiche disziplinspezifische Verfahren der Kurzkalkulation, die die entwicklungsbegleitende Kalkulation unterstützen. Diese wurden in den vorangehenden Teilkapiteln vorgestellt und nach der Zahl der im jeweiligen Verfahren berücksichtigten Einflussgrößen klassifiziert.

Diese Klassifikation ist jedoch bei weitem nicht ausreichend um eine Auswahl und Kombination der einzelnen Methoden zu gewährleisten. Das Problem ist, dass nicht einmal für die ansonsten sehr gut dokumentierten Methoden des klassischen Maschinenwesens eine einheitliche Klassifikation verfügbar ist [EVANS ET AL. 2006, S.1].

Bei näherer Betrachtung der beschriebenen Methoden fällt auf, dass primär gestalterische Merkmale wie Masse, Fläche oder Zahl der Codezeilen berücksichtigt werden. Aspekte der Systemstruktur werden selbst dort, wo ihre Berücksichtigung naheliegend erscheint nicht in Betracht gezogen. So erfolgt die Bewertung verschiedener Hardware/Software Partitionierungen der Elektrotechnik lediglich durch den Vergleich der aufsummierten Schätzkosten der Komponenten der einzelnen Lösungen.

Wenig bis keine Berücksichtigung bei den recherchierten Verfahren der Kurzkalkulation finden die Entwicklungskosten der einzelnen Disziplinen. Gegenstand der Aufwandsschätzung der Informationstechnik ist primär die Entwicklungsphase. Berücksichtigt werden aber allein die reinen Entwicklungszeiten. Der Aufwand für unterstützende, koordinative Aufgaben, die jeder Softwareentwicklung begleiten, bleibt unberücksichtigt bzw. wird in Einzelfällen über Zuschläge berechnet [JANTZEN 2007, JONES 2007]. Im Maschinenwesen und der Elektrotechnik konnten neben einzelnen, sehr spezifischen Ansätzen keine verbreiteten, formalisierten Methoden gefunden werden, die eine Schätzung des Entwicklungsaufwands zielführend unterstützen.

Im Anschluss an die Betrachtung der Verfahren der entwicklungsbegleitenden Kalkulation erfolgte die Analyse des Standes der Forschung und Technik bei der Unterstützung des kostengünstigen Konstruierens. Ein wesentlicher Bestandteil hierbei ist die Identifikation von Überarbeitungsschwerpunkten. Zu diesem Zweck können über alle Disziplinen hinweg Kostenstrukturen aufgestellt werden. Die Ableitung von Überarbeitungsschwerpunkten fällt jedoch trotzdem schwer, solange keine allgemein gültigen Erkenntnisse über kostentreibende Merkmale eines mechatronischen Systemverbunds dokumentiert sind.

Ein weiterer Punkt des kostengünstigen Konstruierens ist die Unterstützung der konzeptionellen, konstruktiven und fertigungs- bzw. implementierungstechnischen Konzeptoptimierung durch entsprechende Gestaltungsrichtlinien bzw. Handlungsanweisungen.

Mit den Handlungsanweisungen des kostengünstigen Konstruierens verhält es sich dabei ähnlich wie zuvor bei den Methoden der entwicklungsbegleitenden Kalkulation. Handlungsanweisungen aus der klassischen, mechanisch geprägten Konstruktionslehre beschäftigen sich mit der kostenoptimierten Gestaltung spezifischer Produktausprägung wie beispielsweise der Positionierung von Schweißnähten (Bild 3-29). Die Ableitung von Rückschlüssen auf die Produktkosten aus der bloßen Beurteilung einer spezifischen Gestaltausprägung einzelner Produktkomponente ist bei stark interdisziplinär vernetzten Produkten jedoch nicht als allein zielführend zu erachten. Hier ist es vielmehr die Konstellation der Produktstruktur mit den ihr zugrunde liegenden Strukturmerkmalen die als kostentreibende Größe nicht zu vernachlässigen ist [BRAUN & LINDEMANN 2008]. Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Ausprägungen der Produktstruktur und der Kostenstruktur sind jedoch bisher nicht dokumentiert. In der Folge gibt es auch keine Handlungsanweisungen zur kostenoptimierten Gestaltung der Produktstruktur – besonders im Sinne einer kostenoptimierten Partitionierung – mechatronischer Produkte.

4 Anforderungen an ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement

Das vorangehende Kapitel diente der Darlegung des Standes der Forschung und Technik der im Zusammenhang mit einem transdisziplinären Zielkostenmanagement relevanten Forschungsgebiete. Jedes dieser drei Forschungsgebiete weist im Hinblick auf die Unterstützung des Kostenmanagements mechatronischer Produkte eigene Defizite auf. Diese wurden jeweils abschließend heraus gearbeitet. Aus der Kombination der identifizierten Defizite lassen sich Handlungsschwerpunkte für die vorliegende Arbeit ableiten. Darauf aufbauend können Anforderungen an ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement formuliert und in einem Lastenheft gesammelt werden.

Die in diesem Lastenheft gesammelten und im Folgenden dargelegten Anforderungen lassen sich in die drei Aspekte „Informationshandhabung“, „Kostenanalyse“ und „Kostenoptimierung“ gliedern. Übergeordnete Anforderungen, die allgemein für die Gestaltung von Leitfäden zur Unterstützung der Produktentwicklung gültig sind, werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

4.1 Handlungsschwerpunkte und grundlegende Anforderungen

Grundlegendes Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Konzeptfindung und -entscheidung bei mechatronischen Produkten unter besonderer Berücksichtigung von Kostenaspekten methodisch zu unterstützen. Zu diesem Zweck soll ein Leitfaden entworfen werden, welcher einem interdisziplinären Entwicklerteam durch die situationsgerechte Bereitstellung geeigneter Methoden bereits in der Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs eine frühzeitige, aussagekräftige Kostenplanung, -kontrolle und -steuerung ermöglicht.

Zentraler Punkt des disziplinübergreifenden Systementwurfs ist die Partitionierung, also die Aufteilung der durch das Produkt zu erbringenden Funktionalität auf die beteiligten Disziplinen. Entscheidet sich das Entwicklerteam also zum Abschluss des disziplinübergreifenden Systementwurfs für eine Partitionierungsvariante, so ist dies eine Entscheidung zwischen Strukturvarianten. Darüber hinaus reichende Informationen zu den einzelnen Systemkomponenten und ihren Schnittstellen stehen zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend zur Verfügung.

Mit dieser Strukturentscheidung geht die Zielkostenspaltung einher, bei der die zuvor festgelegten Zielkosten auf die verschiedenen Systemkomponenten aufgeteilt werden. Unterstützend zur Partitionierung und somit parallel zur Zielkostenspaltung sollte bereits die Zielkostenerreichung als zentraler Schritt des Zielkostenmanagements einsetzen (Bild 4-1). Bestandteile der Zielkostenerreichung sind die entwicklungsbegleitende Kalkulation und das kostengünstige Konstruieren. Beides gilt es bereits in dieser frühen Phase zu unterstützen und auf diese Weise die Auswahl einer kostenoptimalen Partitionierung zu gewährleisten.

Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass zwar einige Autoren die Kostenwirkung der Strukturgestaltung (Architekturgestaltung) in frühen Phasen betonen, sie jedoch weder belegen noch an gewissen Charakteristika fest machen können. So drücken beispielsweise BASHIR

& THOMSON [2001] den Zusammenhang zwischen Produktkomplexität und Kosten formelmäßig aus, zielen dabei jedoch rein auf die Reduktion der Komplexität, die bei ihnen in der zu erbringenden Vielzahl an Funktionen begründet liegt. Dass die Reduktion der Komplexität, wie auch immer sie zuvor bestimmt wurde, nicht das Ziel eines Komplexitätsmanagements sein kann wurde in Kapitel 3.2.2 bereits erörtert. Allen analytischen Ansätzen gemein, seien sie nun aus dem Bereich der mechatronischen Produktentwicklung, dem Komplexitäts- oder dem Kostenmanagement, ist, dass sie keinen Hinweis auf die kostenoptimale Gestaltung der Partitionierung mechatronischer Produkte geben. Sie weisen nicht einmal darauf hin, auf welchem Wege eine Kostenoptimierung in einer solch frühen Phase erzielt werden kann.

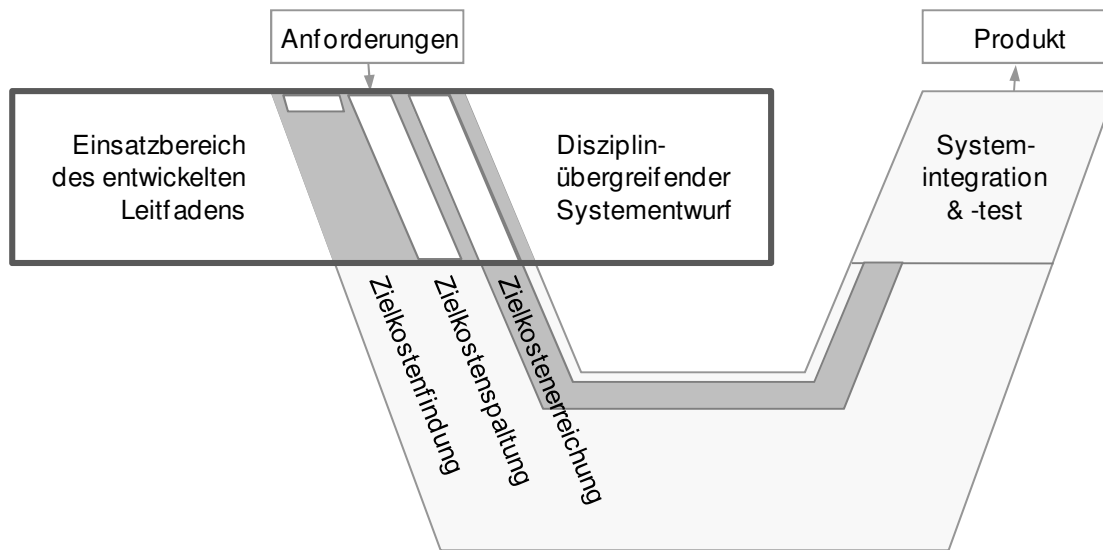


Bild 4-1: Einsatzbereich des entwickelten Leitfadens und Einordnung in das V-Modell der VDI 2206 [VDI 2004]

Um die Auswahl einer geeigneten Partitionierung zu unterstützen bedarf es zunächst einmal einer geeigneten Modellierungsmethode, die es erlaubt die strukturellen Eigenschaften der Konzeptvarianten über alle Disziplinen hinweg vergleichbar abzubilden. In Kapitel 3.2.1 wurde der Multiple-Domain Matrix (MDM) Ansatz vorgestellt und seine Eignung für diese Aufgabe dargelegt. Allerdings bedarf selbst der MDM Ansatz noch einiger Erweiterungen, um den identifizierten Defiziten zu begegnen.

Um die enge Verknüpfung von Produkt- und Prozesskomplexität abzubilden sollte die zur Unterstützung der Partitionierung einzusetzende MDM die Domänen Funktionen, Komponenten, Prozesse und Ressourcen umfassen. Innerhalb sowie zwischen den zugehörigen Ebenen – Funktions-, Komponenten-, Prozess- und Ressourcenebene – spiegelt sich die Komplexität eines mechatronischen Produktes und des dazugehörigen Produkterstellungsprozesses wider. Zwar ist in dieser frühen Phase der Produkterstellungsprozess des betrachteten Produktes noch nicht komplett individuell ausgestaltet, da hierzu benötigte Informationen wie Gestaltparameter noch fehlen, doch kann an dieser Stelle auf Erfahrungen und Vorgehenspläne aus Vorgängerprojekten zurück gegriffen werden. Die Berücksichtigung von Prozessschritten und die durch sie verbrauchten Ressourcen in Form von Prozesskosten wurden als ein wesentlicher Punkt des Kostenmanagements mechatronischer Produkte identifiziert.

Um Kosten in einer MDM handhaben zu können, bedarf es einer Erweiterung der Berechnungs- und Transformationsmethoden, die es beispielsweise ermöglicht Prozesskosten konsistent in Komponenten- oder auch Funktionskosten umzuwandeln. Wie bei der Pfadkostenrechnung berücksichtigt, lassen sich der Erstellungsprozess eines Produktes und somit seine Prozesskosten mit fortschreitender Dauer des Entwicklungsprozesses immer detaillierter beschreiben. Diese zeitliche Konkretisierung gilt es ebenfalls mit Hilfe des MDM Ansatzes abzubilden.

Zur Unterstützung der entwicklungsbegleitenden Kalkulation existieren in den unterschiedlichen Disziplinen zahlreiche Verfahren der Kurzkalkulation. Um deren Auswahl bzw. Kombination zu unterstützen bedarf es wie in Kapitel 3.3.5 beschrieben einem Ordnungs- und Auswahlschema. Allen der vorgestellten Analysemethoden gemein ist, dass sie primär gestalterische Merkmale berücksichtigen. Zum einen stellt dies aufgrund der mangelnden Informationen im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs ein Problem dar. Zum anderen sind die kostentreibenden Gestaltparameter der Disziplinen so unterschiedlich, dass die einzelnen Kurzkalkulationsverfahren nur schwer übertragbar und kombinierbar sind. Aus diesem Grund wurde die zusätzliche Berücksichtigung von Strukturaspekten bei der Kostenfrüherkennung argumentiert.

Allerdings erscheint die Verwendung der vorgestellten Komplexitätsmetriken aufgrund ihrer doch sehr eingeschränkten Aussagefähigkeit als wenig zielführend. Deutlich sinnvoller ist der Einsatz einer Strukturanalyse und anschließender -optimierung nach dem Vorbild des Komplexitätsmanagements nach MAURER [2007]. Dabei sollten zwei Ziele verfolgt werden: Zum einen die Identifikation von Überarbeitungsschwerpunkten und zum anderen die Unterstützung der konzeptionellen, konstruktiven und fertigungs- bzw. implementierungstechnischen Konzeptoptimierung durch entsprechende Gestaltungsrichtlinien bzw. Handlungsanweisungen.

Um die von Maurer genannten Merkmale (Bild 3-16) auf eine Strukturanalyse unter monetären Gesichtspunkten anzuwenden, müssen sie zunächst auf ihre diesbezügliche Aussagefähigkeit und Kostenwirkung hin untersucht werden. Beispielhafte Untersuchungen finden sich bei VAN WIE ET AL. [2001], die unter anderem den Einfluss der Schnittstellenzahl auf die Montagekosten über die Produkte unterschiedlicher Hersteller hinweg untersucht haben. Zusätzlich bedarf es einer Zuordnung der Merkmale zu den durch sie sinnvoll zu untersuchenden Strukturen. Solche Merkmalssammlungen existieren bisher lediglich für die DSM-basierte Prozessanalyse. In diesem Bereich gibt es auch erste Handlungsanweisungen zur Optimierung der Prozessstruktur unter Kostengesichtspunkten. Um solche Handlungsanweisungen zur kostenoptimierten Gestaltung der Produktstruktur – besonders im Sinne einer kostenoptimierten Partitionierung – mechatronischer Produkte zu entwickeln, bedarf es Erkenntnissen über den Zusammenhang zwischen Ausprägungen der Produktstruktur und der Kostenstruktur.

4.2 Lastenheft des transdisziplinären Zielkostenmanagements

Die Handlungsschwerpunkte und grundlegenden Anforderungen des voran gehenden Kapitels lassen sich grob in drei Sinnabschnitte unterteilen. Zum einen existieren Anforderungen an die *Informationshandhabung* im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs. Zum anderen werden zahlreiche Anforderungen an die *Kostenanalyse* und die sich anschließende *Kostenoptimierung* gestellt, die es mit Hilfe des zu entwickelnden Leitfadens zu erfüllen gilt.

Sinnvollerweise unterstützt der Leitfaden die Modellierung von *Funktions-, Komponenten-, Prozess- und Ressourcenebene*. Auf jeder dieser Ebenen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen der Informationshandhabung, Kostenanalyse und Kostenoptimierung.

4.2.1 Anforderungen der Informationshandhabung

Basis für eine frühzeitige Kostenfrüherkennung und in der Folge ein erfolgreiches Zielkostenmanagement mechatronischer Produkte ist eine geeignete Darstellung der in einer frühen Phase der Produktentwicklung vorhandenen Produktinformationen.

Die Abbildung der Informationen sollte dabei **unabhängig von disziplinspezifischen Modellierungssprachen** in Form eines **durchgängigen Informationsmodells** erfolgen, welches sowohl die Funktions- und Komponentenebene als auch die Prozess- und Ressourcenebene umfasst. Die bereits dargestellten Vorarbeiten haben gezeigt, dass für diese Aufgabe eine Multiple-Domain Matrix (MDM) eine sinnvolle Basis bildet, die es zur Erfüllung der weiteren Anforderungen jedoch weiter zu entwickeln gilt. Die einzelnen **Teilmatrizen des Modells** sollen in der MDM **miteinander vernetzt** sein und durch definierte **Transformationsregeln und Formeln** in einander überführbar sein. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass unterschiedliche Blickwinkel abgebildet werden können. Dies betrifft insbesondere die Komponentenstruktur für die beispielsweise funktionale oder physikalische Zusammenhänge modelliert werden können.

Da es mit unter das Ziel des zu entwickelnden Ansatzes ist, Kostenabschätzungen auf Basis der strukturellen Komplexität des zu beurteilenden Konzeptes zu treffen ist es notwendig, dass **strukturelle Informationen** und Zusammenhänge ebenso eindeutig abgebildet werden wie (numerische) **Kosteninformationen**.

Zu modellierende Kosteninformationen umfassen sowohl **Ziel-** als auch **Schätzkosten**. Die **Umrechnung** von Schätzkosten der Prozessebene in Komponentenschätzkosten muss dabei ebenso gewährleistet werden wie die Transformation von Funktionszielkosten in Komponentenzielkosten.

Unterschiedliche Konzeptvarianten sollten sowohl hinsichtlich ihrer Produkt- und Prozessstruktur als auch ihrer Kosten intuitiv vergleichbar sein. Während des entwicklungsbegleitenden Einsatzes sollte eine **fortlaufende Konkretisierung** des Informationsmodells ermöglicht werden.

Ein wesentlicher Aspekt der Akzeptanz eines neu entwickelten Ansatzes ist der damit verbundene Aufwand für den Entwickler. Um diesen möglichst gering zu halten, sollte das System eine **Wiederverwendung** von in der Vergangenheit angelegten Produkt- und Prozessstrukturen unterstützen.

4.2.2 Anforderungen der Kostenanalyse

Im Rahmen der Kostenanalyse sollte der zu entwickelnde Ansatz den entwicklungsbegleitenden **Vergleich von Ziel- und aktuellen Schätzkosten** im Sinne des Target Costing ermöglichen.

Eine entwicklungsbegleitende Kalkulation soll dabei sowohl auf der **Funktions-** als auch auf der **Komponenten- und Prozessebene** unterstützt werden. Um den Aufwand der Kostenschätzung möglichst gering zu halten sollten **potenzielle Kostentreiber** bereits im Vorfeld einer detaillierteren Kostenschätzung **identifiziert** werden können.

Für die eigentliche Schätzung bedarf es einer Unterstützung, die **allen beteiligten Disziplinen zugänglich** ist. Zu diesem Zweck sollten die Eigenschaften disziplinspezifischer Methoden der **Kurzkalkulation** berücksichtigt werden und die einzelnen Methoden in geeigneter Form kombiniert bzw. integriert werden. Die Methodenauswahl soll durch eine vergleichbare Beschreibung und **Klassifizierung der Methoden** unterstützt werden. Bei der eigentlichen Abschätzung der Kosten macht es gerade in frühen Phasen Sinn, **Schätzunsicherheiten** zu berücksichtigen [NEFF 2002, S.137ff].

4.2.3 Anforderungen der Kostenoptimierung

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es das kostengünstige Konstruieren um die **Berücksichtigung von Strukturaspekten** zu erweitern. Mit dem zu entwickelnden Ansatz soll es ermöglicht werden, **Kostentreiber und Stoßrichtungen für kostensenkende Überarbeitungen** zu identifizieren. Dies betrifft zum einen das Aufdecken von Systemanteilen, die als Ansatzpunkt zur Kostensenkung besonders geeignet sind. Berücksichtigt werden sollen kostensenkende Maßnahmen, die sich sowohl auf **Alternativen der Funktionserfüllung** und die **Überarbeitung von Elementen und ihren Schnittstellen** aber auch auf die grundlegende **Umgestaltung der Herstellprozesse** und den **Einsatz alternativer Ressourcen** beziehen. Erreicht werden soll dies unter anderem durch die Identifikation **kostenwirksamer Strukturmerkmale**.

Die angestrebte Kenntnis kostenwirksamer Strukturmerkmale und somit das Wissen über Kostentreiber mechatronischer Produkte soll eine **kostenorientierte Strukturgestaltung** von Beginn der Produktentwicklung an ermöglichen.

5 Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement

Auf Basis der ermittelten und im vorangehenden Kapitel dargelegten Anforderungen an ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein entsprechender Leitfaden entwickelt. Der Aufbau dieses Leitfadens, sowie die darin integrierten, neu entwickelten Hilfsmittel zur Unterstützung eines transdisziplinären Zielkostenmanagements werden im Folgenden anhand des Beispiels der dynamischen Nachführung eines Lidar-Sensors im PKW beschrieben. Das Beispiel ist dem Leser bereits aus Kapitel 1.1, in welchem die Motivation zur Verfassung der vorliegenden Arbeit argumentiert wurde, bekannt.

Nach SEIDENSCHWARZ [1991, S.198] gliedert sich der Prozess des Target Costing in die Phasen Zielkostenfindung, Zielkostenspaltung und Zielkostenerreichung (vgl. Kapitel 3.3.1). Wie gezeigt wurde, besteht im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs mechatronischer Produkte insbesondere der Bedarf nach einer methodischen Unterstützung der parallelen Prozesse der Zielkostenspaltung und der Zielkostenerreichung (vgl. Kapitel 4). Hierbei müssen im Speziellen die identifizierten Anforderungen der *Informationshandhabung, Kostenanalyse und Kostenoptimierung* berücksichtigt werden. Eine besondere Herausforderung besteht in der Berücksichtigung der Tatsache, dass sich diese Anforderungen auf unterschiedliche Ebenen der Produktkonkretisierung beziehen. Ergänzend zur Funktions- und Komponentenstruktur des zu entwickelnden Produktes ist es außerdem notwendig die Struktur des späteren Herstellungsprozesses zu berücksichtigen. Denn neben Charakteristika der *Funktions- und Komponentenebene* haben auch bereits in früher Phase abzusehende Eigenschaften der *Prozessebene* einen entscheidenden Einfluss auf den Ressourcenverbrauch, welcher auf der *Ressourcenebene* abgebildet wird.

Der hier vorgestellte Leitfaden stützt sich auf einen Zielkostenmanagement-Referenzprozess (vgl. Bild 5-1 und Kapitel 5.2). Dieser umfasst gemäß den Anforderungen die Kostenkontrolle und -optimierung während des Entwurfs der Funktions-, Komponenten und Prozessstruktur des zu entwickelnden Produktes in der frühen Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs. Das interdisziplinäre Entwicklerteam wird mit Hilfe des Referenzmodells durch den Entwicklungsprozess geleitet und bekommt Hilfsmittel an die Hand, die es ermöglichen die Kosten auf den durchlaufenen Ebenen abzuschätzen, zu modellieren, ineinander überzuführen und mit den Funktions- bzw. Komponentenzielkosten zu vergleichen. Auf diese Weise können Kostenabweichungen frühzeitig erkannt werden. Durch die Anwendung der angebotenen Hilfsmittel bekommt das Entwicklerteam zudem Anregungen zur kostenorientierten Konzeptoptimierung bzw. Anstöße zum Entwurf alternativer, kostengünstigerer Konzeptvarianten. Eine Konzeptoptimierung unter weiteren Gesichtspunkten wie beispielsweise Gewicht oder Zuverlässigkeit wird durch den Leitfaden nicht berücksichtigt.

Ergebnis des Systementwurfs ist ein disziplinübergreifendes Lösungskonzept, welches in der sich anschließenden Phase des disziplinspezifischen Entwurfs durch die einzelnen Disziplinen weiter konkretisiert wird. Das Lösungskonzept geht dabei aus einer abschließenden Bewertung und Auswahl entwickelter Lösungskonzeptalternativen hervor. Hierbei unterstützt der Leitfaden den monetären Vergleich der Konzeptalternativen und ermöglicht somit die Auswahl des aus Kostensicht zu favorisierenden Konzeptes. Die Unterstützung einer umfassenden Bewertung und abschließenden Auswahl zum Ende des disziplinübergreifenden System-

entwurfs ist dabei nicht Gegenstand des hier vorgestellten Leitfadens, da in diesem Zuge noch andere Aspekte wie das Gewicht, die Zuverlässigkeit, die Realisierbarkeit oder auch die erwartete Marktakzeptanz des Lösungskonzeptes Berücksichtigung finden müssen [WARTZACK 2001].

Mit Festlegung des Lösungskonzeptes ist die Zielkostenspaltung abgeschlossen. Das heißt die Verteilung der Zielkosten auf die Komponenten des Konzeptes und somit der veranschlagte Ressourcenverbrauch für die Entwickler der einzelnen Disziplinen ist festgelegt. Nicht abgeschlossen ist die Zielkostenerreichung. Diese ist sowohl innerhalb der Disziplinen als auch durch eine disziplinübergreifende Instanz fortzusetzen.

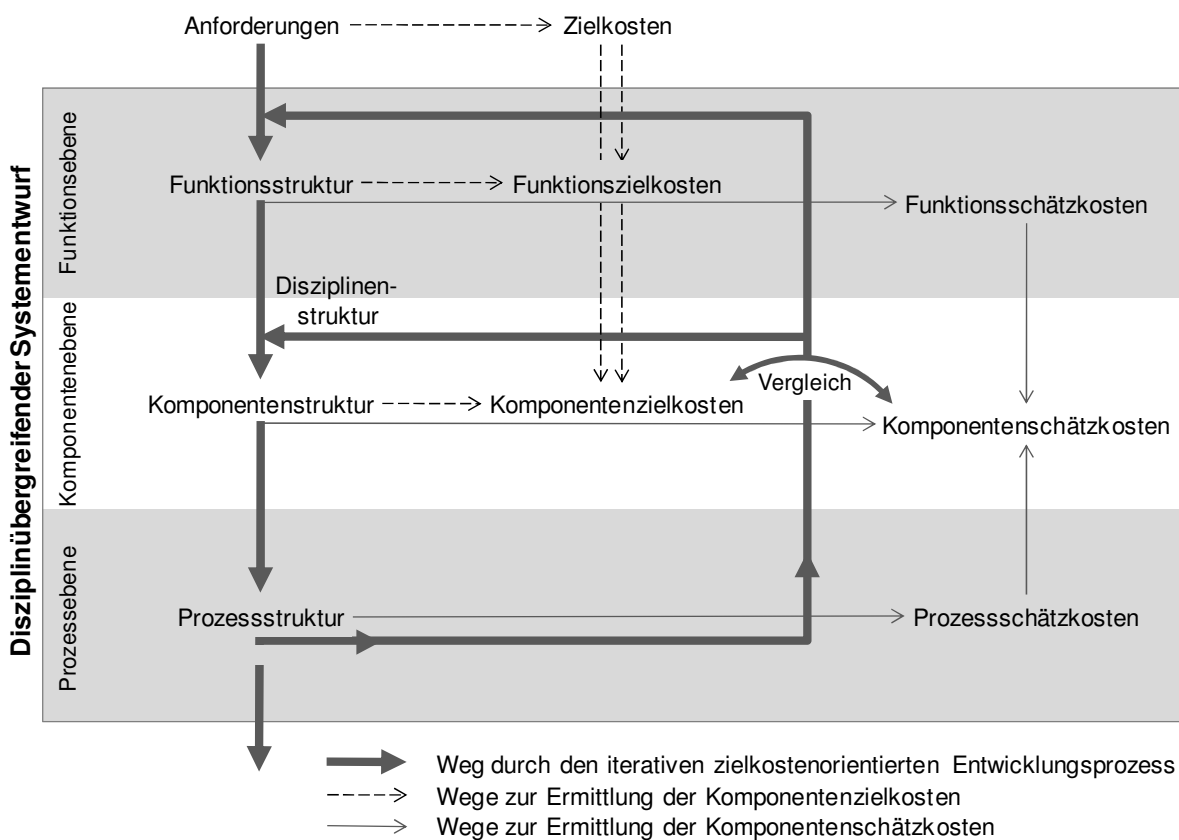


Bild 5-1: Aufbau des Referenzprozesses

Die Beschreibung des Leitfadens und die Erläuterung der entwickelten Hilfsmittel erfolgt anhand des Beispiels der dynamischen Nachführung eines Lidar-Sensors im PKW (s. a. GRÜNEIBL 2008). Der betrachtete Lidar-Sensor ist dabei Bestandteil eines Fahrerassistenzsystems zur Geschwindigkeits- und Abstandsregelung, das den Fahrer bei langen, monotonen Strecken entlasten soll.

Ein solches Adaptive Cruise Control (ACC), realisiert die Abstandsregelung durch Bestimmung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug und resultierendes Bremsen bzw. Beschleunigen. Die einzuhaltende Distanz kann dabei zuvor eingestellt, oder auch jederzeit ver-

ändert werden. Sobald die Fahrbahn frei ist, beschleunigt das Assistenzsystem den PKW auf die gewünschte Geschwindigkeit (Bild 5-2).

Bei der Abstandsmessung mittels Lidar-Sensor sendet dieser Laserpulse in Richtung eines möglichen vorausfahrenden Fahrzeugs aus und detektiert das gegebenenfalls am Heck des Fahrzeugs zurückgestreute Licht. Aus der Lichtlaufzeit und der Lichtgeschwindigkeit wird die Entfernung zum Ort der Streuung, also zum vorausfahrenden Fahrzeug, berechnet.

Eine statische oder dynamische Veränderung der Fahrzeuglage, beispielsweise durch schweres Beladen des Kofferraums oder durch Beschleunigen und Bremsen, verursacht ein Einfedern bzw. Einnicken des Fahrzeugs. Dadurch besteht die Gefahr, dass notwendige Messungen zu einem vorausfahrenden Fahrzeug verfälscht werden oder sogar komplett ausbleiben, da dieses nicht mehr erfasst werden kann. Durch die hier beschriebenen und als Beispiel dienenden Varianten einer Nachführung des Lidar-Sensors sollen solche Veränderung in Zukunft kompensiert werden. Zusätzlich zu einer speziellen Lagerung bedarf die situationsgerechte Nachführung des Lidarstrahls bei den meisten Konzeptalternativen einer separaten Bestimmung des Winkels, der durch die Lagerung auszugleichen ist. Die Realisierung dieser Funktion wird nachfolgend nicht betrachtet.

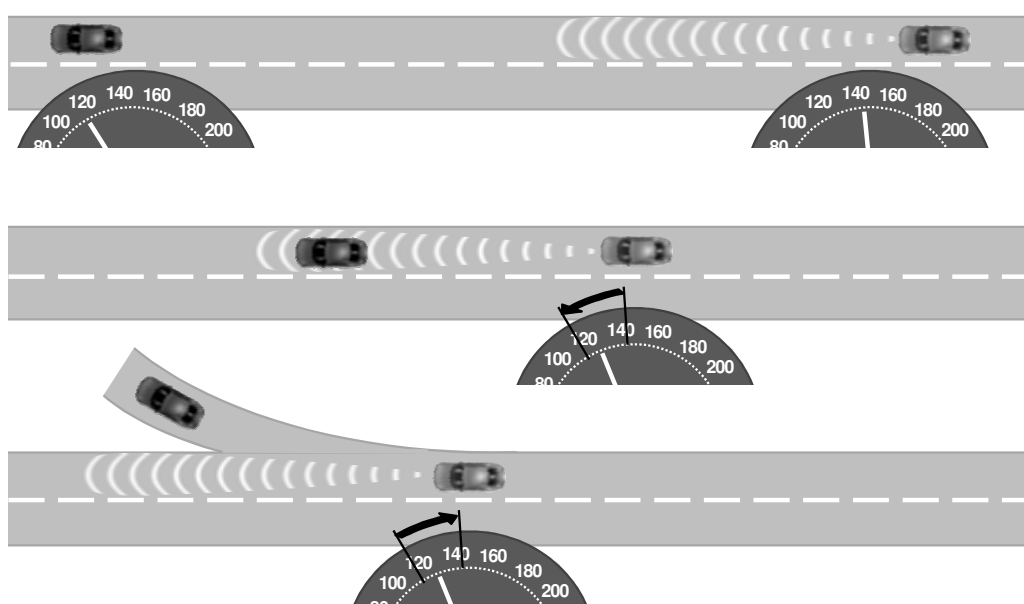


Bild 5-2: Prinzip des Adaptive Cruise Control

Im ersten Teilkapitel (Kapitel 5.1) werden nun zunächst die im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs sinnvoll zu entwerfenden Ausprägungen der Systemstruktur in der chronologischen Reihenfolge ihrer Erstellung dargelegt. Diese Strukturmodelle sind wie bereits zuvor knapp beschrieben in den Referenzprozess des Leitfadens eingebunden. Sowohl der detaillierte Aufbau des Referenzprozesses als auch des diesen umschließenden Leitfadens werden in Kapitel 5.2 beschrieben. Daran anschließend beschreiben die Teilkapitel 5.3 bis 5.5 die in den Leitfaden eingebetteten Hilfsmittel der Informationshandhabung, Kostenanalyse und Kostenoptimierung.

5.1 Strukturen des disziplinübergreifenden Systementwurfs

Im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs werden Modelle erstellt um den Entwurfsprozess zu unterstützen. Grundlegend wurden diese bereits in Kapitel 3.1 vorgestellt. Da der entwickelte Zielkostenmanagement-Leitfaden auf die Verwendung spezieller Strukturmodelle ausgerichtet ist, wird hier das konkrete Vorgehen unter Verwendung der begleitenden Modelle vorgestellt.

Ausgehend von den in einer Anforderungsliste festgehaltenen Anforderungen an das zu entwickelnde System, werden zunächst die funktionalen Anforderungen in Form einer Funktionshierarchie aufbereitet und falls möglich bereits weiter konkretisiert.

So gliedert sich im vorliegenden Beispiel die Funktion *Lidarstrahl geforderter Neigung emittieren und empfangen* in die Teilfunktionen *Lidarstrahl emittieren*, *Lidarstrahl umlenken* und *Lidarstrahl empfangen* (Bild 5-3). Die Funktion *Lidarstrahl umlenken* resultiert daraus, dass die vorne am Fahrzeug montierte Lidarquelle zunächst in Richtung des Fahrzeuginnenraums emittiert, ihr Strahl jedoch dann mittels eines Spiegels in Fahrtrichtung umgelenkt wird. Umgekehrt passiert dies mit dem zurückgeworfenen Strahl, der vor der Erfassung durch den Empfänger ebenfalls über denselben Spiegel umgelenkt wird. Dieses Funktionsprinzip bereits existierender Lidar-Sensoren ohne Nachführung sollte auch bei der beschriebenen Konzeptüberarbeitung beibehalten werden.

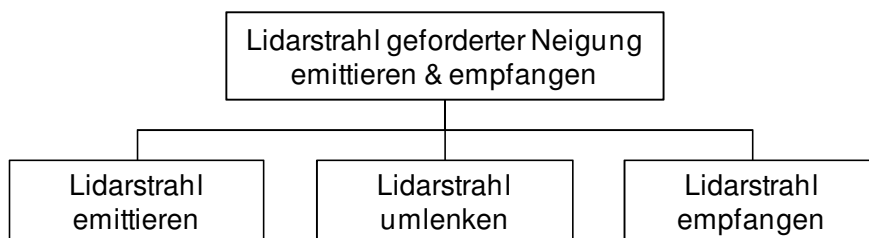


Bild 5-3: Funktionshierarchie

Nach der ersten Zusammenstellung der Teilfunktionen können die bereits identifizierten Teilfunktionen mittels eines Funktionsmodells weiter konkretisiert und erste Konzeptalternativen gebildet werden.

Für die Funktionsmodellierung des betrachteten Systems bietet sich ein umsatzorientiertes Funktionsmodell [LINDEMANN 2009, S. 119F] an, in dem die Energie des Lidarstrahls als Hauptumsatz modelliert wird. Bei der Darstellung in Bild 5-4 handelt es sich um eine vereinfachte Version der Modellierung, bei der nicht alle Zwischenzustände zwischen den einzelnen Funktionen, sondern nur die primär betrachteten, abgebildet werden.

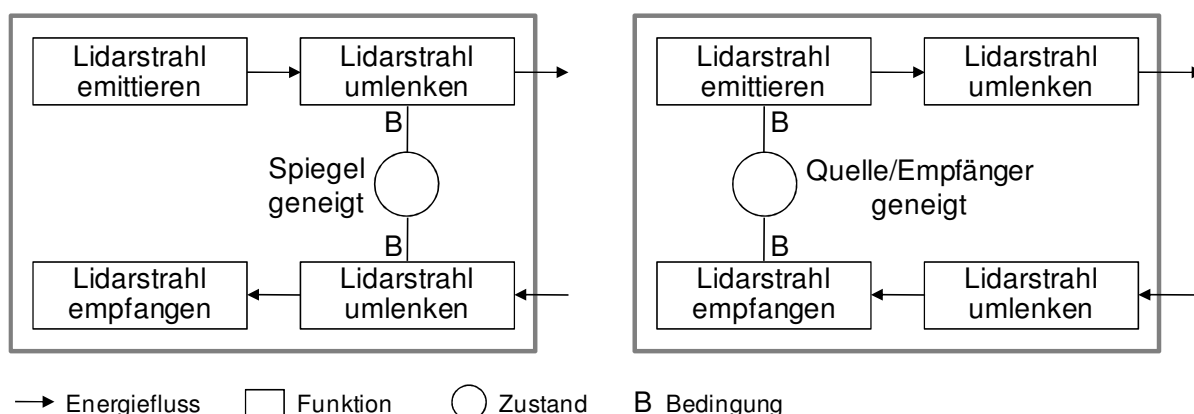


Bild 5-4: Zwei alternative Funktionsmodelle der dynamischen Lidarnachführung

Aus den beiden Funktionsmodellen gehen bereits zwei prinzipiell unterschiedliche Konzeptvarianten zur Nachführung des Lidarstrahls hervor. So wird im ersten Fall die Winkeländerung des austretenden Lidarstrahls durch die Änderung des Anstellwinkels des den Strahl vor Austritt umlenkenden Spiegels erreicht. Im zweiten Fall wird das komplette Quelle/Empfänger-System geneigt.

Betrachtet man nur die Alternative bei der der Spiegel geneigt wird und entsprechend rotatorisch gelagert ist, bieten sich auch hier weitere Alternativen (Bild 5-5). So besteht die Möglichkeit den Spiegel mittels eines direkt an seinem Lagerzapfen angebrachten rotatorischen Antriebs zu neigen (*I.*). Alternativ kann eine rotatorische Antriebskraft in eine lineare Kraft gewandelt werden, welche an einem gegenüber der Drehachse vertikal versetzten Punkt des Spiegels ansetzt und ihn auf diese Weise dreht (*II.*). Die Erzeugung einer rotatorischen Antriebskraft mit anschließender Wandlung kann durch den direkten Einsatz eines linearen Antriebs ersetzt werden (*III.*).

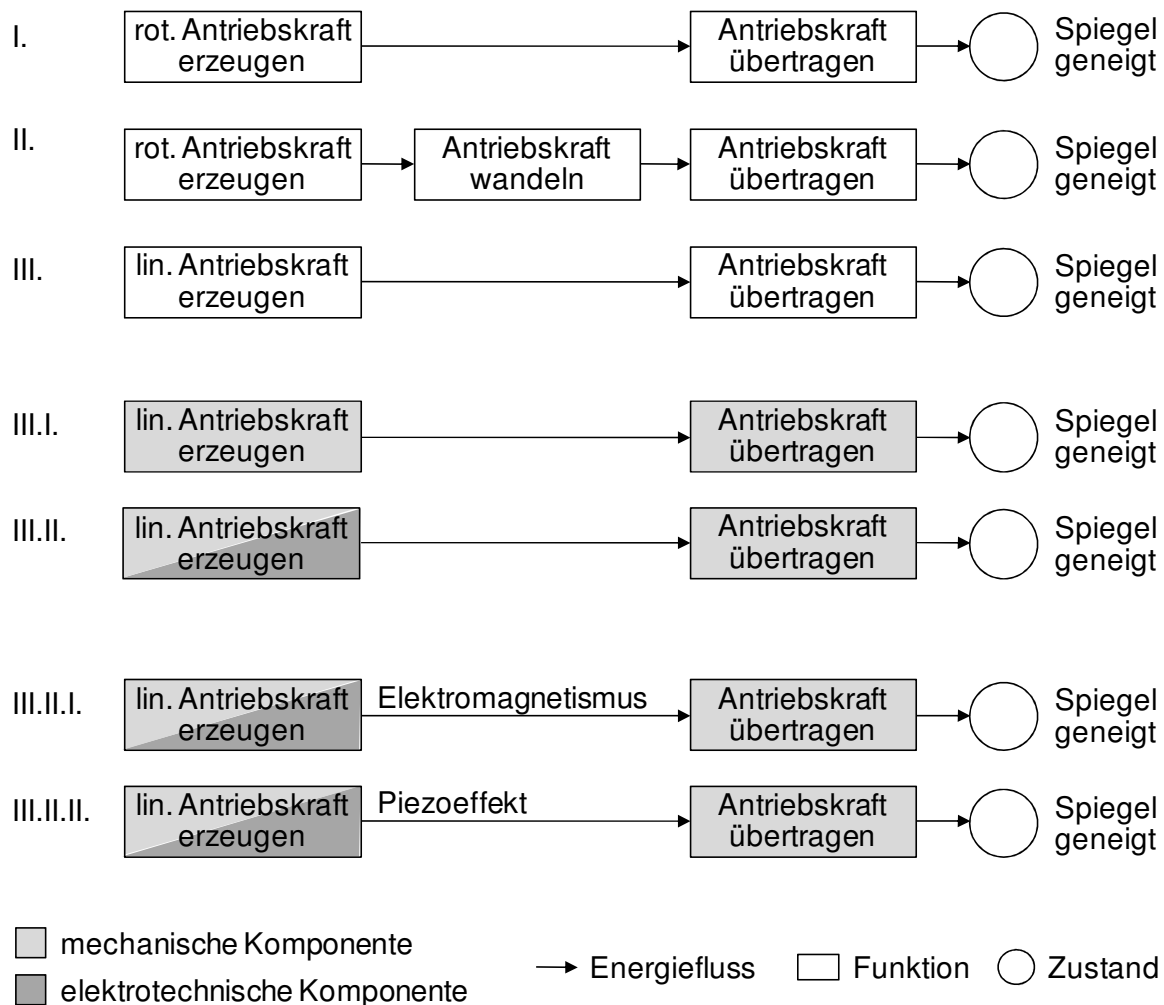


Bild 5-5: Alternativenbildung bei der Funktionsmodellierung und Partitionierung

Aus jeder der vorgestellten Konzeptalternativen können in der Folge durch Partitionierung weitere Konzeptalternativen generiert werden. So kann die Erzeugung einer linearen Antriebskraft rein mechanisch beispielsweise durch ein Masse-Dämpfer System realisiert werden (III.I). Die naheliegendste Möglichkeit besteht darin einen elektromechanischen Aktor zu verwenden (III.II). Dabei können dann wiederum unterschiedliche physikalische Effekte realisiert werden. So sind an dieser Stelle beispielsweise ein System aus zwei Elektromagneten und einem Stator (III.II.I) oder ein Piezoantrieb (III.II.II) denkbar.

Auf dem dargestellten Weg lassen sich wie gezeigt zahlreiche alternative Möglichkeiten der Erfüllung der ursprünglichen drei Teilfunktionen finden. Für die weiteren Erläuterungen dieses Kapitels wird, aufgrund ihrer Anschaulichkeit, die Variante einer linearen Antriebskraft-erzeugung mittels zweier Elektromagnete und eines am Spiegel angebrachten Stators verwendet. Bild 5-6 zeigt das entsprechend erweiterte umsatzorientierte Funktionsmodell dieser Konzeptalternative.

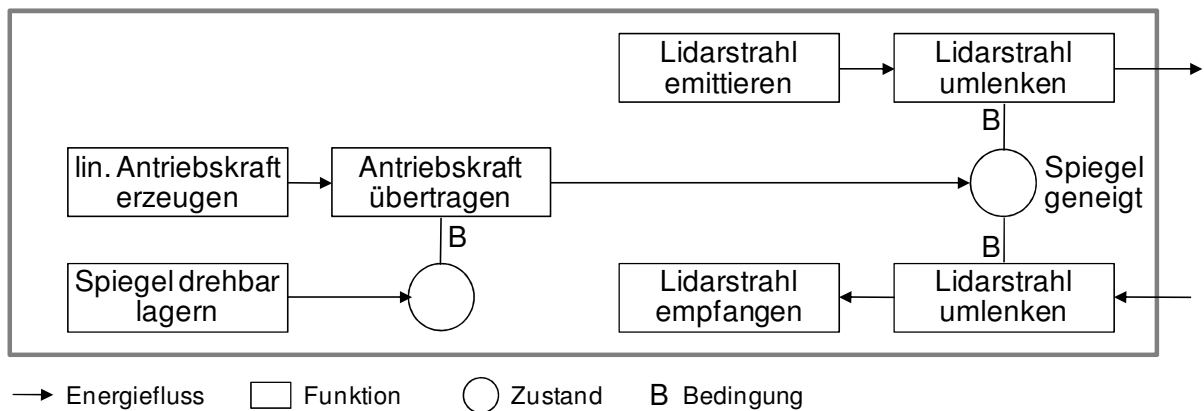


Bild 5-6: Funktionsmodell der dynamischen Lidarnachführung

Das Funktionsmodell beschreibt eine mögliche Konzeptausprägung bei der insgesamt sechs unterschiedliche Teilfunktionen zu realisieren sind. Diese sechs Teilfunktionen sind entsprechend des Modells miteinander vernetzt.

Wie bereits zuvor angedeutet können die Teilfunktionen durch unterschiedliche physikalische Effekte realisiert werden. Die tatsächliche Umsetzung eines ausgewählten physikalischen Effektes erfolgt durch das definierte Zusammenspiel unterschiedlicher Komponenten im Produkt. So können in einem ersten Schritt den sechs Teilfunktionen insgesamt 13 Komponenten zugeordnet werden. Um den Gedanken der Partitionierung noch mehr zu verdeutlichen sind diese in Bild 5-7 entsprechend ihrer Disziplinzugehörigkeit eingefärbt.

Lidarstrahl emittieren	Quelle	Kontrolleinheit	Gehäuse	Leiterplatte
Lidarstrahl umlenken	Spiegel			
lin. Antriebskraft erzeugen	Magnete (2x)	Kontrolleinheit	Leiterplatte	
Antriebskraft übertragen	Stator			
Spiegel drehbar lagern	Zapfen (2x)	Lager (2x)	Leiterplatte	
Lidarstrahl empfangen	Empfänger	Kontrolleinheit	Gehäuse	Leiterplatte

mechanische Komponente
 elektrotechnische Komponente
 softwaretechnische Komponente

Bild 5-7: Komponenten zur Realisierung der Funktionen

Ebenso wie die Teilfunktionen sind auch die Komponenten untereinander vernetzt. Die physikalische Komponentenstruktur beschreibt dabei die Verbindung der Komponenten über Energie-, Informations- und Stoffflüsse. Neben der physikalischen Komponentenstruktur finden in der vorliegenden Arbeit auch die funktionale und die prozessuale Komponentenstruktur Berücksichtigung. Die funktionale Komponentenstruktur drückt dabei aus, welche Komponenten aufgrund einer gemeinsamen Funktionserbringung miteinander verknüpft sind (vgl. Kapitel 3.2). Die prozessuale Komponentenstruktur beschreibt in Ergänzung, welche Komponenten aufgrund ihrer gemeinsamen Bearbeitung in einem Prozessschritt miteinander vernetzt sind. Da die funktionale und die prozessuale Komponentenstruktur im Rahmen des hier vorgestellten Vorgehens nicht manuell im Laufe der Entwicklung erstellt werden, sondern zu Analyse Zwecken berechnet werden, finden sich entsprechende Beispiele erst in den Kapiteln 5.3 und 5.5.

Bild 5-8 zeigt die physikalische Komponentenstruktur des Beispiels der dynamischen Lidar Nachführung. Ohne an dieser Stelle bereits auf die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Analysen zur Kostenoptimierung vorzugreifen, wird aus dem Graphen bereits die zentrale Rolle der *Leiterplatte* deutlich. Diese steht im Kontrast zum *Gehäuse* welches im Randbereich des Graphen angeordnet ist.

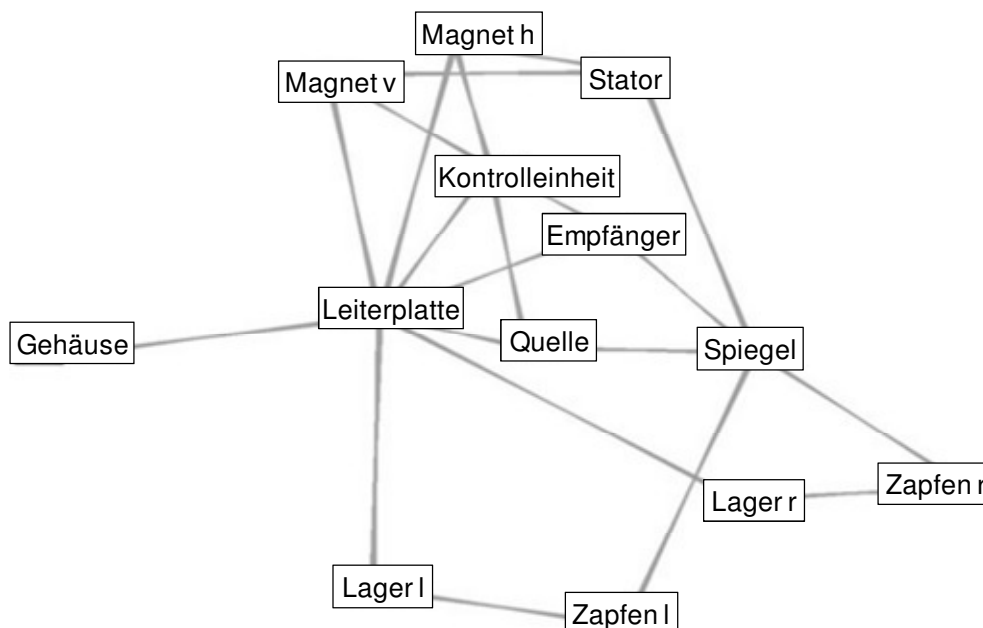


Bild 5-8: Stärkebasierter Graph der physikalischen Komponentenstruktur

Nach dem Durchlaufen der Funktions- und der Komponentenebene erfolgt der Übergang zur Prozessebene. Sie beschreibt in welchen Prozessen die Komponenten des zu entwickelnden Produktes realisiert werden. In dieser frühen Phase ist der modellierte Prozess primär aus sehr rudimentären Prozessschritten aufgebaut. Detailliertere Informationen zu einzelnen Komponenten bzw. den zu ihrer Erstellung notwendigen Prozessschritten lassen sich jedoch teilweise aus Vorgängerprojekten ableiten.

Der hier vorgestellte Ansatz zur Modellierung der Prozessstruktur orientiert sich an der, in Kapitel 3.3.2 vorgestellten, Pfadkostenrechnung nach GAHR [2006]. So werden in einem ersten Schritt auf Makrofadenebene die durch die Erstellung des betrachteten Produktes betroffenen Unternehmensbereiche oder -funktionen identifiziert. Im vorliegenden Beispiel sind das die *Entwicklung und Konstruktion*, der *Einkauf*, die *Fertigung und Implementierung* sowie *Test und Integration*. Diese werden in vertikaler Richtung angeordnet. Anschließend erfolgt eine Detaillierung in horizontaler Richtung durch das Anfügen von Prozessbausteinen bzw. kompletten Pfadmodulen. Die Makrofadenebene wird somit verfeinert und eine Mikrofadenebene entsteht. Die Anwendungspfadenebene repräsentiert jeweils die tiefste Detaillierungsebene eines Zweiges (Bild 5-9) [GAHR 2006, S.87].

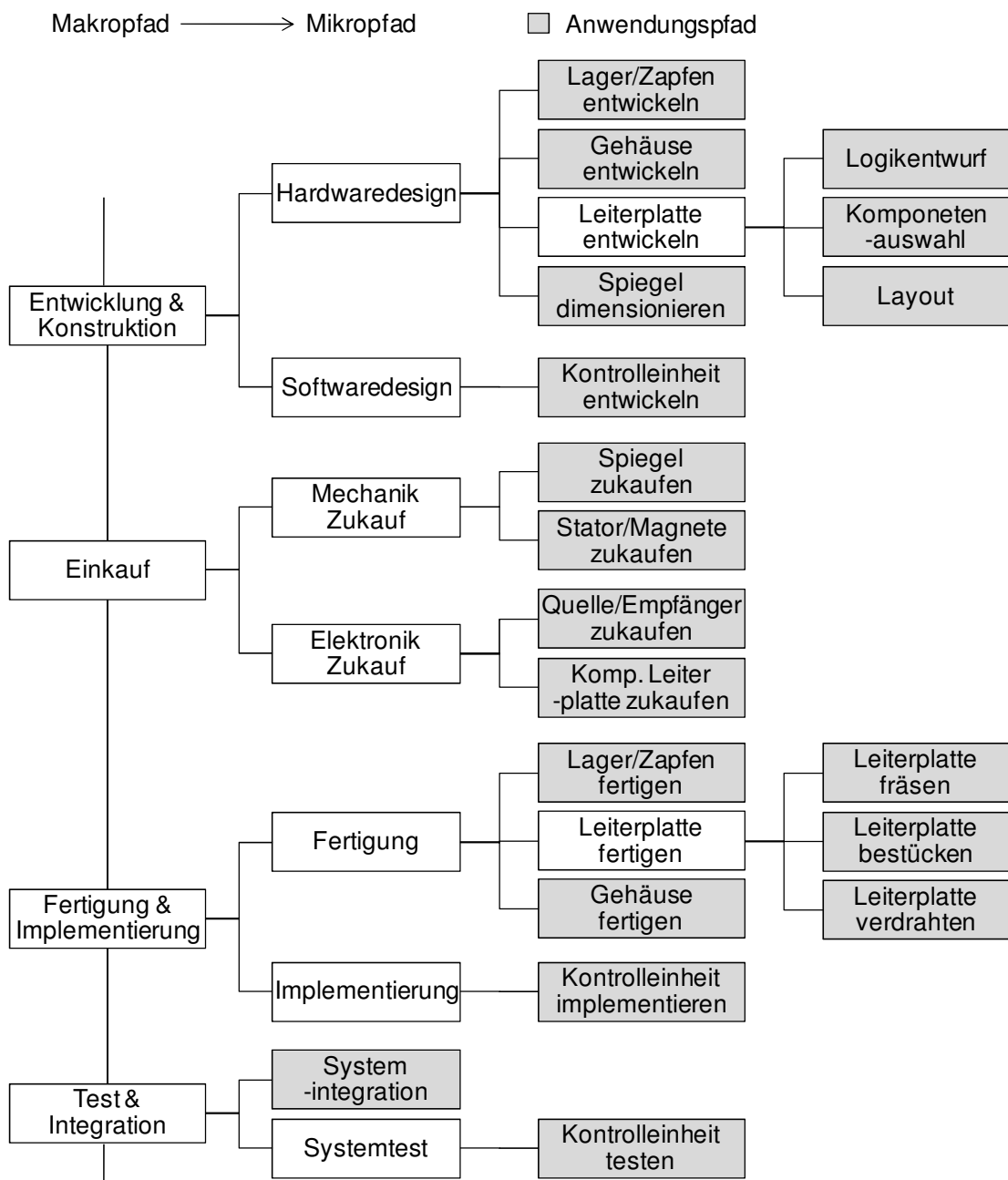


Bild 5-9: Pfadmodell der Erstellung einer Lidar-Nachführung

Das Pfadmodell wird wie beschrieben aus einzelnen Elementen, den Prozessbausteinen, oder auch aus bereits vordefinierten Pfadmodulen, vergleichbar mit einer Prozessbaugruppe, aufgebaut. Diese können einem unternehmensspezifischen Prozessbaukasten entnommen werden. Die Prozessbausteine können je nach Detaillierungsebene (Makro-, Mikro-, Anwendungspfad) eine Phase, einen Prozess oder eine Aktivität repräsentieren. Die Pfadkostenrechnung ermöglicht es außerdem in besonders frühen Phasen oder für reine Zukaufteile Kosten ohne Prozessbezug zu integrieren [GAHR & LINDEMANN 2005]. Durch Rückführung erarbeiteter Pfadmodelle oder auch nur einzelner Pfadmodule oder Prozessbausteine in den Prozessbaukasten können diese für zukünftige Produktentwicklungen aufwandsarm wieder verwendet werden.

Bild 5-9 zeigt ein beispielhaftes Pfadmodell für die Erstellung der dynamischen Lidar Nachführung. Wie zuvor auf Funktions- und Komponentenebene gezeigt besteht auch auf der Prozessebene die Möglichkeit der Variantenbildung. So ist es beispielsweise denkbar, dass die Quelle/Empfänger-Einheit, da sie eine Kernkompetenz des Unternehmens darstellt, nicht von extern zu gekauft wird, sondern vor Ort entwickelt und gefertigt wird. Die Modellierung eines Prozesspfades entspricht also der Bildung eines Produkterstellungsszenarios.

Die einzelnen Prozessschritte verursachen Kosten durch den Verbrauch von Ressourcen. Jedem Prozess kann mindestens eine durch ihn verbrauchte Ressource zugeordnet werden. Ressourcen können unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden: Beispielsweise Personal, Betriebsmittel, Material, Information/EDV, Gebäude oder Finanzen/Kapital. Ähnlich wie bei der Definition der Prozessbausteine muss hier auf unternehmensspezifische Größen zugegriffen werden (vorhandene Kompetenzen, Fertigungsanlagen, ...).

Die Zuordnung von Ressourcen zu Prozessschritten erfolgt auf Basis vorangegangener Projekte. Die Prozessbausteine der Prozessebene verursachen einen Ressourcenverbrauch, der in seiner Art (z. B. Personal Softwareentwicklung, Material Halbzeuge, ...) aus Vorgängerprojekten bekannt ist. Wurde im Rahmen der Prozessebenenenerstellung ein neuer Prozessbaustein generiert, ist die zugehörige Art des Ressourcenverbrauchs einmalig „manuell“ festzulegen.

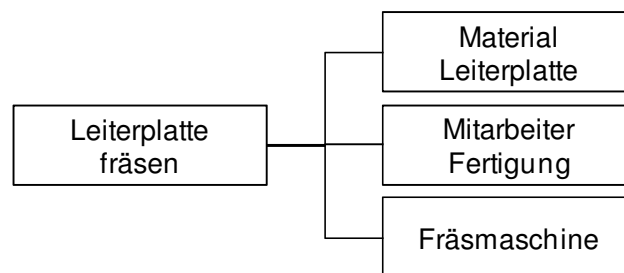


Bild 5-10: Prinzip der Ressourcenanbindung

Im in Bild 5-10 dargestellten Beispiel benötigt man für den Prozessschritt *Leiterplatte fräsen* zum einen das Rohmaterial und zum anderen einen Mitarbeiter der Fertigung. Die abzuzahlende und zu betreibende Fräsmaschine wird ebenso als Ressource betrachtet.

Um die Kosten eines einzelnen Prozessschrittes zu bestimmen muss der Ressourcenverzehr jeder einzelnen Ressource abgeschätzt werden. So müsste im vorliegenden Fall beispielsweise die Zeit, die der Mitarbeiter der Fertigung zur Bedienung der Fräsmaschine benötigt geschätzt werden. Wie dieser Prozess unterstützt werden kann wird in Kapitel 5.4 näher erläutert. Hier finden sich auch Methoden zur direkten Abschätzung einzelner Funktionen oder auch Komponenten für den Fall, dass eine aktivitätsorientierte Kostenschätzung zu aufwändig bzw. aufgrund der vorliegenden Informationen nicht möglich ist.

5.2 Grundlegender Aufbau des Leitfadens und Integration der Hilfsmittel

Wie einleitend beschrieben stützt sich der hier vorzustellende Leitfaden auf einen Zielkostenmanagement-Referenzprozess (Bild 5-11). Die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Strukturen lassen sich diesem Prozess direkt zuordnen. So erkennt man in Bild 5-11 auf der linken Seite den Übergang von den Anforderungen zur Funktionsstruktur (1), über die Disziplinstruktur weiter zur Komponentenstruktur (2a/2b) bis hin zur Prozessstruktur (3). Auf diesem Grundgerüst setzt nun der unterstützte Zielkostenmanagementprozess auf. Dieser ist aus insgesamt 14 Grundschritten aufgebaut, die nun im Folgenden näher beschrieben werden.

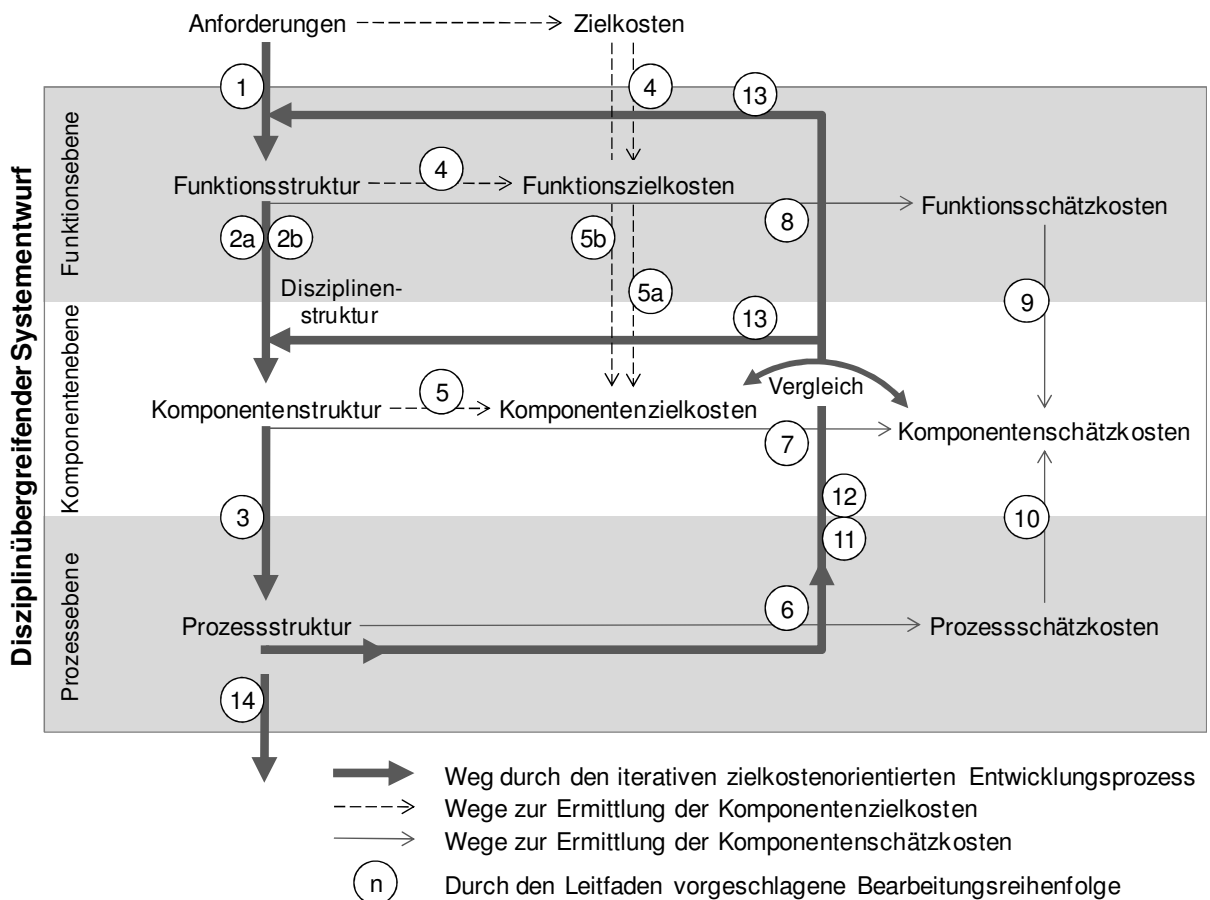


Bild 5-11: Die 14 Grundschritte des Leitfadens

Sobald eine erste Funktionsstruktur aus den Anforderungen abgeleitet wurde, können den einzelnen Teilfunktionen Zielkosten, so genannte Funktionszielkosten, zugeordnet werden. Zu diesem Zweck müssen die einzelnen Teilfunktionen gemäß ihrer Kundenrelevanz gewichtet werden. Die Funktionszielkosten erhält man dann aus der Multiplikation der Gewichte mit den Gesamtzielkosten (4).

Auf Basis der Funktionsstruktur können diverse Ausprägungen der Komponentenstruktur gebildet werden. Im vorangehenden Kapitel 5.1 wurde ausführlich beschrieben wie die physikalische Komponentenstruktur aus der Funktionsstruktur entsteht (2a). Neben der physikalischen Komponentenstruktur kann auch die funktionale Komponentenstruktur aus der Funktionsstruktur abgeleitet werden (2b). Sie lässt sich aus der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten errechnen (Kapitel 5.3).

Sind die grundlegenden Komponenten eines Lösungskonzeptes modelliert, können diesen ebenfalls Zielkosten zugeordnet werden (5). Hierzu können zum einen bereits definierte Funktionszielkosten genutzt werden: In einer Zielkostenmatrix [TANAKA 1989, S.62F] wird der Beitrag jeder einzelnen Komponente zur Erfüllung der einzelnen Teilfunktionen festgehalten. Durch Multiplikation dieser Prozentzahl mit den Zielkosten der gegenübergestellten Teilfunktion erhält man den Kostenanteil der Komponente, der sich rein auf die Erfüllung dieser Teilfunktion bezieht. Bildet man die Summe über alle Funktionen an denen die betrachtete Komponente beteiligt ist, so erhält man ihre Zielkosten (5a). Zum anderen besteht die Möglichkeit die Gesamtzielkosten direkt auf die einzelnen Komponenten umzulegen (5b). Hierzu muss die Relevanz der einzelnen Komponenten bezüglich der zu erbringenden Gesamtfunktion beurteilt werden.

Schritt (3) des Referenzprozesses beschreibt, wie auf Basis einer entwickelten Komponentenstruktur eine Prozessstruktur für die praktische Realisierung des Produktes modelliert werden kann (vgl. auch Kapitel 5.1).

Zu den einzelnen Prozessschritten erfolgt im vorliegenden Referenzprozess keine Zuordnung von Zielkosten. Auch eine direkte Überarbeitung der Prozessstruktur auf Basis der im Folgenden beschriebenen Kostenanalysen ist nicht vorgesehen. Beides liegt darin begründet, dass es das primäre Ziel des disziplinübergreifenden Systementwurfs ist ein übergreifendes Produktkonzept zu definieren. Die Ausarbeitung eines konkreten Prozesskonzeptes, welches dann für eine Optimierung zur Verfügung steht, kann jedoch erst auf Basis dieses Produktkonzeptes sinnvoll erfolgen. Während der Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs liegt der Fokus der Modellierung der Prozessstruktur auf der Erfassung der wesentlichen Arbeitsschritte des Erstellungsprozesses. Ziel dabei ist es insbesondere, grundlegende Unterschiede der Erstellungsprozesse zweier Produktkonzeptalternativen herauszuarbeiten. Diese Unterschiede schlagen sich in den geschätzten Prozesskosten nieder. Somit kann beispielsweise unterschieden werden, ob ein Konzept mehr Absicherungsbedarf hat als ein konkurrierendes und die Komponenten- oder auch Funktionsstruktur des späteren Lösungskonzeptes entsprechen gewählt werden. Die zeitliche Anordnung und kostenoptimale Aneinanderreihung einzelner Prozessschritte steht jedoch zu diesem frühen Zeitpunkt noch nicht im Fokus.

Bis hierher wurde gezeigt, wie Zielkosten in den Referenzprozess eingearbeitet sind. Den Zielkosten gegenüber stehen in der Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs die Schätzkosten. Die Kosten des Produktes können sowohl auf Prozess- als auch auf Kompo-

ten- oder Funktionsebene abgeschätzt werden (6/7/8). Für jede Ebene werden Hilfsmittel der Kostenschätzung, so genannte Kurzkalkulationsverfahren, zur Verfügung gestellt. Eine Beschreibung der einzelnen Hilfsmittel erfolgt in Kapitel 5.4.

Ausgangspunkt der Kostenoptimierung und somit auch des vorangehenden Kosten-Soll-/Ist-Vergleichs ist im vorgestellten Referenzprozess die Komponentenstruktur in ihren unterschiedlichen Ausprägungen. Somit sollten geschätzte Prozess- bzw. Funktionskosten in Komponentenkosten übersetzt werden (9/10). Wie dies rechnerisch realisiert wird, wird in Kapitel 5.3 beschrieben.

Liegen sowohl Komponentenzielkosten als auch Komponentenschätzkosten vor, so kann ein Vergleich erfolgen. Allein aus den, sich durch das entwickelte Konzept der Handhabung von Kosteninformationen in MDM-Notation ergebenden, zusätzlichen Vergleichs- und Analysemöglichkeiten ergeben sich Impulse für die kostenoptimierende Überarbeitung der Funktions- und Komponentenstruktur (11). Zusätzliche Optimierungsansätze ergeben sich aus Strukturanalysen der physikalischen als auch der funktionalen Komponentenstruktur (12). Beide Ansätze werden in Kapitel 5.5 beschrieben.

Auf Basis der Optimierungsansätze kann dann eine Überarbeitung der Funktions- bzw. der Komponentenstruktur erfolgen (13).

Am Ende des disziplinübergreifenden Systementwurfs steht die Auswahl eines weiter zu verfolgenden Lösungskonzeptes. Zur Unterstützung des monetären Konzeptvergleichs bietet der Leitfaden ebenfalls Hilfsmittel an (14). Diese werden in Kapitel 5.3 beschrieben.

In der Darstellung als auch in der Beschreibung des Referenzprozesses fehlt die Ressourcenebene. Der Ressourcenverbrauch wird jedoch von jeder der drei weiteren Ebenen aus bestimmt. Schätzt man die Kosten auf der Funktions- oder auch Komponentenebene, so überspringt man im Endeffekt die Zuordnung verbrauchter Ressourcen, und springt direkt zur Schätzung der Kosten der betrachteten Funktion oder Komponente. Trotz allem setzt man mit der Schätzung der Kosten einen bestimmten Ressourcenverbrauch voraus. Explizit in Erscheinung tritt die Ressourcenebene nur bei der aktivitätsorientierten Kostenschätzung über das Pfadmodell. Hier werden Ressourcen direkt einzelnen Prozessschritten zugeordnet und die Größe ihres Verzehrs geschätzt. Aus dem Ressourcenverzehr und dem Stundensatz ergeben sich die Kosten.

Aus der Beschreibung des Referenzprozesses wird bereits deutlich an welchen Stellen des Zielkostenmanagementprozesses besonderer Bedarf für den Einsatz von Hilfsmitteln besteht. Diese Hilfsmittel werden im entwickelten Leitfaden den 14 Schritten des Referenzprozesses zugeordnet und ihr Einsatz exemplarisch erläutert.

Bild 5-12 zeigt einen Ausschnitt aus dem Leitfaden anhand dessen der Aufbau erklärt werden soll. Der komplett ausgearbeitete, 16-seitige Leitfaden findet sich im Anhang 9.1 dieser Dissertation.

Jeder Schritt des Referenzprozesses wird in einem separaten Abschnitt des Leitfadens behandelt. Eine Einordnung der Beschreibungen in den Referenzprozess geschieht über die Nummerierung des Referenzmodells aus Bild 5-1.

Die Dokumentation jedes einzelnen Schrittes ist wie folgt aufgebaut:

- **Nummer und Bezeichnung** des Schrittes
- Beschreibung des **Vorgehens** und Benennung der einzusetzenden **Hilfsmittel** (zum Teil mit beispielhafter Anwendung)
- Beschreibung des Vorgehens bei der **Modellbildung** anhand eines durchgehenden Beispiels

Die *Vorgehensbeschreibung* umfasst eine sehr allgemein gehaltene Beschreibung dessen, was im Rahmen des Schrittes erarbeitet wird. Bei der Benennung der *Hilfsmittel* werden auch Hilfsmittel benannt, die nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu entwickelt wurden. In diesen Fällen wird auf weiterführende Literatur verwiesen und auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet. Beim Großteil der Schritte erfolgt die Darstellung einer beispielhaften Anwendung der genannten Hilfsmittel. Für die Informationshandhabung im Rahmen des beschriebenen Referenzprozesses wurde ein durchgängiges Konzept auf Basis der Multiple-Domain Matrix Notation entwickelt. Mit jedem Schritt des Referenzprozesses wird das Informationsmodell erweitert. Somit umfasst der Punkt *Modellbildung* eine Vorgehensbeschreibung zur Integration der im aktuell betrachteten Schritt erarbeiteten Informationen in das Informationsmodell. Der Aufbau dieses Modells und sein Einsatz bei der parallelen Struktur- und Kostenmodellierung mechatronischer Produkte wird im folgenden Kapitel 5.3 beschrieben.

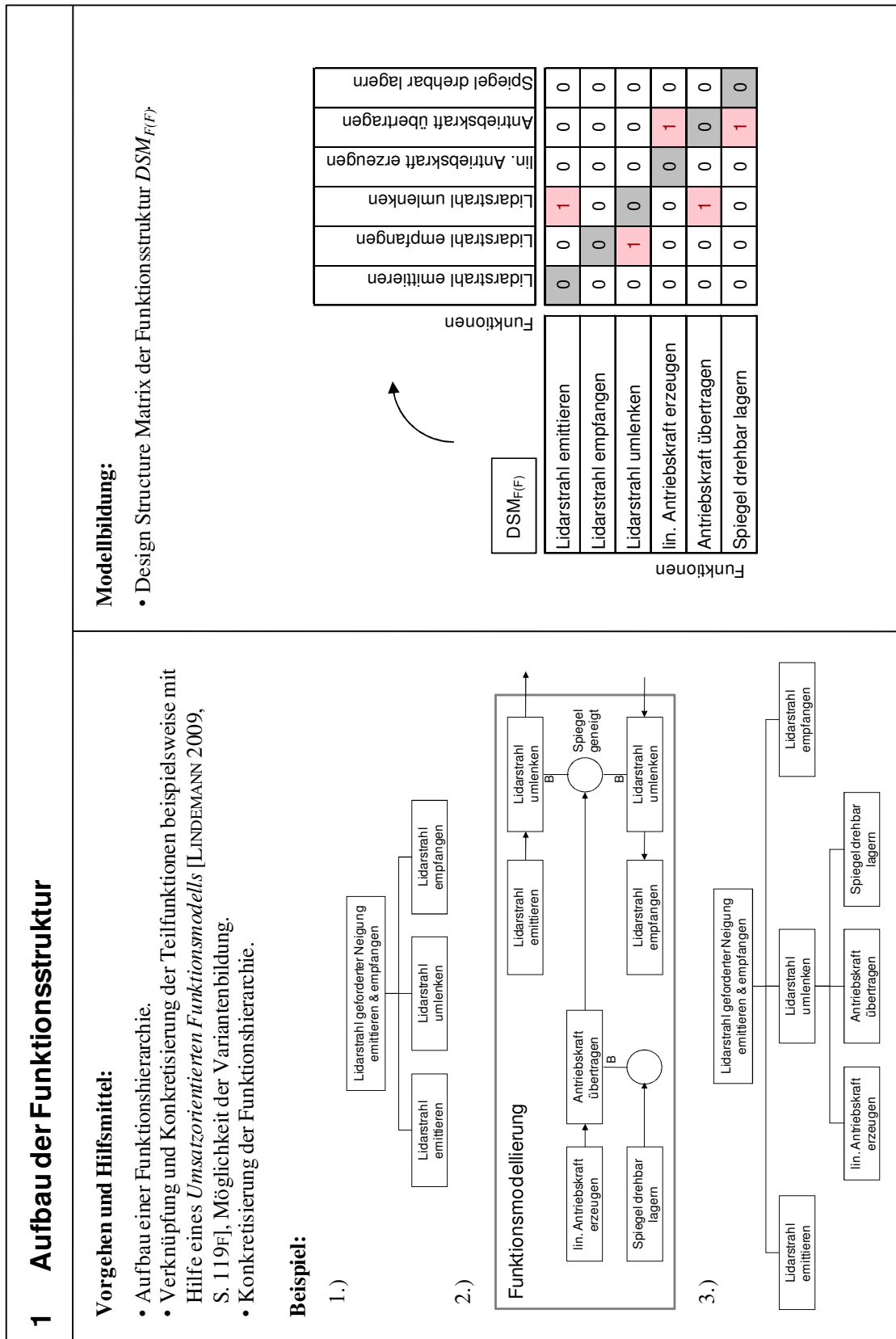


Bild 5-12: Auszug aus dem Leitfaden des transdisziplinären Zielkostenmanagements

5.3 Struktur- und Kostenmodellierung

Dieses Kapitel zeigt nun, wie die in Kapitel 5.1 vorgestellten Strukturmodelle in das erarbeitete Konzept der Informationshandhabung eingebettet sind. In der bisher gezeigten Form unterstützen die Modelle zwar einzelne Schritte des Entwicklungsprozesses, stehen jedoch nicht direkt miteinander in Verbindung. Das heißt, eine Durchgängigkeit der Modellierung ist nicht gegeben. Auch sind die Modelle in ihrer graphischen Notation nur für kleine Entwicklungsumfänge ausreichend übersichtlich. Für eine rechnergestützte Analyse sind sie in dieser Form ebenfalls nicht geeignet. Des Weiteren wurde bereits angedeutet, dass zu Analysezwecken weitere Strukturmodelle aus den bisher vorgestellten rechnerisch hergeleitet werden müssen. Und zu guter letzt wurde bisher nicht gezeigt, wie Kosten den einzelnen Elementen der Modelle zugeordnet werden können, um darauf aufbauend frühzeitige Kostenanalysen durchzuführen und Anstöße für Kostenoptimierungsmaßnahmen zu finden.

Die Strukturmodellierung und -analyse des entwickelten Leitfadens baut auf dem von MAURER [2007] entwickelten Multiple-Domain Ansatz auf (vgl. Kapitel 3.2). Dies bedeutet, dass die strukturellen Informationen der vorgestellten Elementarmodelle entweder in Form einer Design Structure Matrix (DSM) oder in Form einer Domain Mapping Matrix (DMM) abgebildet werden. Eine DSM kommt zum Einsatz, wenn Verknüpfungen innerhalb einer Domäne abgebildet werden sollen wie beispielsweise bei der aus der umsatzorientierten Funktionsmodellierung gewonnenen Funktionsstruktur oder der physikalischen Komponentenstruktur. Eine DMM eignet sich für die Modellierung von domänenübergreifenden Verknüpfungen wie beispielsweise bei der Anbindung von Komponenten an Funktionen oder Prozessschritten an Komponenten. Eine Multiple-Domain Matrix (MDM) ergibt sich aus der entsprechenden Kombination von DSMs und DMMs mit der zusätzlichen Erweiterung um Berechnungs- und Transformationsmethoden [MAURER 2007, S.60ff], die hier primär im Rahmen der Kostenanalyse und -optimierung Einsatz finden werden.

Bild 5-13 zeigt nun zum einen die Umsetzung der in Kapitel 5.1 mittels umsatzorientierter Funktionsmodellierung hergeleiteten Funktionsstruktur der dynamischen Lidarnachführung in Form einer DSM. Diese wird in der Folge als $DSM_{F(F)}$ bezeichnet um kenntlich zu machen, dass es sich um eine native Form der Funktionsstruktur handelt, die also direkt aus einer Funktionsmodellierung erstellt wurde³⁰. Die gewählte Darstellung beschränkt sich rein auf die Abbildung struktureller Zusammenhänge zwischen den Teilfunktionen. Welcher Art die Verbindung zwischen den Teilfunktionen ist, also ob ein Energie-, Informations- oder Stofffluss vorliegt, ist für die hier durchgeführten Betrachtungen nicht von Interesse.

Des Weiteren findet sich in Bild 5-13 die Teilfunktionen F und Komponenten K verknüpfende Domain Mapping Matrix DMM_{F-K} . In dieser sind die gleichen Informationen enthalten wie in Bild 5-7.

Außerdem zeigt Bild 5-13 zwei Ausprägungen der Komponentenstruktur. Die im Vordergrund liegende ist die native, physikalische Komponentenstruktur $DSM_{K(K)}$. Auch an dieser

³⁰ Der erste Index dieser Nomenklatur beschreibt den Typ der Struktur. So steht ein F für die Funktionsstruktur und ein K für die Komponentenstruktur. Ist der in Klammern folgende Buchstabe mit dem ersten identisch, so handelt es sich um die native Form der Struktur. Weichen die Buchstaben voneinander ab, so wurde die entsprechende Matrix aus der Verknüpfung der beiden Domänen berechnet. Beispielsweise wird die funktionale Komponentenstruktur $DSM_{K(F)}$ aus der Verknüpfung von Komponenten K und Funktionen F berechnet. Eine komplette Aufstellung der Nomenklatur findet sich im Anhang 9.1.

Stelle interessiert für die anschließenden Analysen nur der strukturelle Zusammenhang der Komponenten. Die Art und Weise ihrer Verbindung wird ebenso wie die Richtung der Verbindung in der Matrix nicht dargestellt³¹.

Hinter der physikalischen Komponentenstruktur liegend erkennt man die funktionale Komponentenstruktur $DSM_{K(F)}$. Hier lässt das in Klammern gestellte (F) erkennen, dass es sich nicht um eine native Form der Komponentenstruktur handelt. Die funktionale Komponentenstruktur wurde durch Berechnung aus der Anbindung von Komponenten an Teilfunktionen bestimmt. Sie drückt aus, welche Komponenten aufgrund einer gemeinsamen Funktionserbringung miteinander verknüpft sind (vgl. Kapitel 3.2). Zu ihrer Berechnung kam folgende Formel zum Einsatz ([MAURER 2007, S.85FF] und Bild 3-13):

$$DSM_{K(F)} = DMM_{F-K}^T \cdot DMM_{F-K}$$

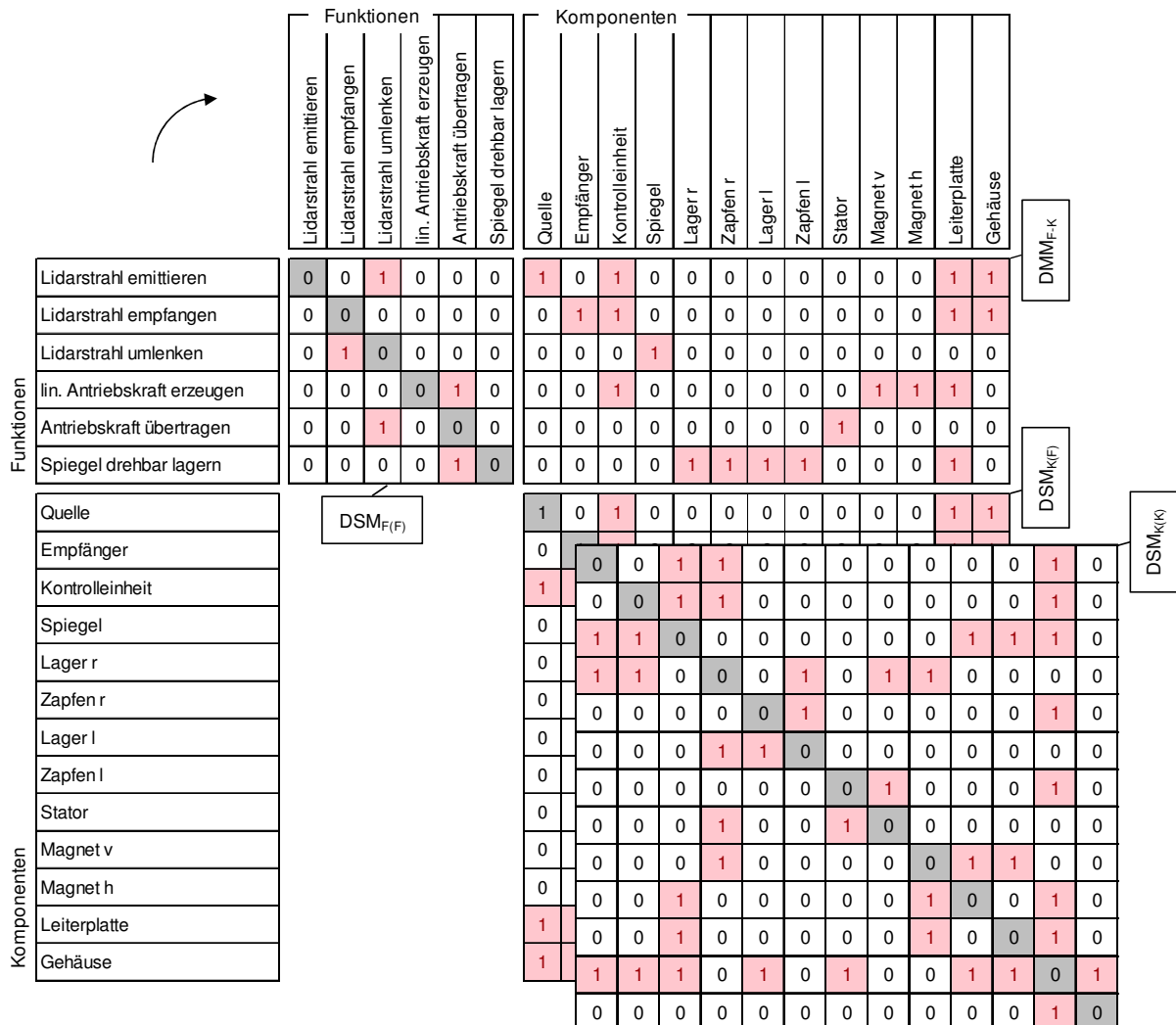


Bild 5-13: Funktionsstruktur, Komponentenstruktur und ihre Verknüpfung

³¹ Die Einbeziehung dieser zusätzlichen Informationen in die im Folgenden beschriebenen Analysen birgt mögliches Potenzial zur Erweiterung des hier vorgestellten Ansatzes und wird zusammen mit weiteren Punkten im Ausblick 7.3 dieser Dissertation diskutiert.

Kapitel 5.1 beschreibt neben der Konkretisierung der Produktstruktur auch das Vorgehen bei der Erarbeitung einer ersten, groben Prozessstruktur auf Basis von Informationen von Vorgängerprojekten. Die in Bild 5-9 dargestellten Prozessbausteine P lassen sich mit Hilfe einer DMM ihren zugehörigen Komponenten K zuordnen. Die resultierende DMM_{K-P} ist in Bild 5-14 dargestellt.

DMM _{K-P}		Prozessschritte																			
		Lager/Zapfen entwickeln	Gehäuse entwickeln	Logikentwurf	Komponentenauswahl	Layout	Spiegel dimensionieren	Kontrolleinheit entwickeln	Spiegel zukaufen	Stator/Magnete zukaufen	Quelle/Empfänger zukaufen	Komponenten Leiterplatte zukaufen	Lager/Zapfen fertigen	Leiterplatte fräsen	Leiterplatte bestücken	Leiterplatte verdrahten	Gehäuse fertigen	Kontrolleinheit implementieren	Systemintegration	Kontrolleinheit testen	
Komponenten	Quelle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Empfänger	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Kontrolleinheit	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	Spiegel	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Lager r	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	Zapfen r	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	Lager l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	Zapfen l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Magnet v	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Magnet h	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Leiterplatte	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
	Gehäuse	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

Bild 5-14: Anbindung der Prozessbausteine an die Komponenten der dynamischen Lidarnachführung

In Ergänzung kann auch die zeitliche Prozessstruktur in Form einer DSM modelliert werden. Wie schon erwähnt, ist eine Optimierung der zeitlichen Aufeinanderfolge und der resultierenden Verknüpfung einzelner Prozessbausteine erst zu einem späteren Zeitpunkt relevant und wird deshalb in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Jedoch ist die gegebene Erweiterbarkeit des Informationsmodells um Möglichkeiten der kostenorientierten Prozessanalyse von großem Vorteil und gewährleistet die durchgängige Anwendbarkeit eines in frühen Phasen aufgestellten Modells über den kompletten Entwicklungszeitraum hinweg.

Die Anbindung von Ressourcen R an Prozessbausteine P erfolgt in Analogie zur Anbindung von Komponenten an Funktionen bzw. Prozessbausteinen an Komponenten in Form einer DMM_{P-R} .

Bild 5-15 gibt einen Überblick über die aus den beschriebenen Einzelmatrixen aufgebaute Multiple-Domain Matrix. Das in diesem Kapitel zu Erklärungszwecken dargestellte – stark vereinfachte – Beispiel der dynamischen Lidarnachführung lässt bereits erkennen, dass eine solche MDM sehr schnell erhebliche Ausmaße annimmt. Aus diesem Grund spart das Zurückgreifen auf einen unternehmensspezifischen Prozessbaukasten nach dem Vorbild der Pfadkostenrechnung zum Aufbau der Prozess- und Ressourcenebene erheblich Zeit. Da der Leitfaden insbesondere bei Funktionserweiterungen oder -verbesserungen, also Anpassungskonstruktionen, bestehender Produkte zum Einsatz kommen soll, lässt sich das Prinzip der Wiederverwendung auch auf die Funktions- und Komponentenebene übertragen.

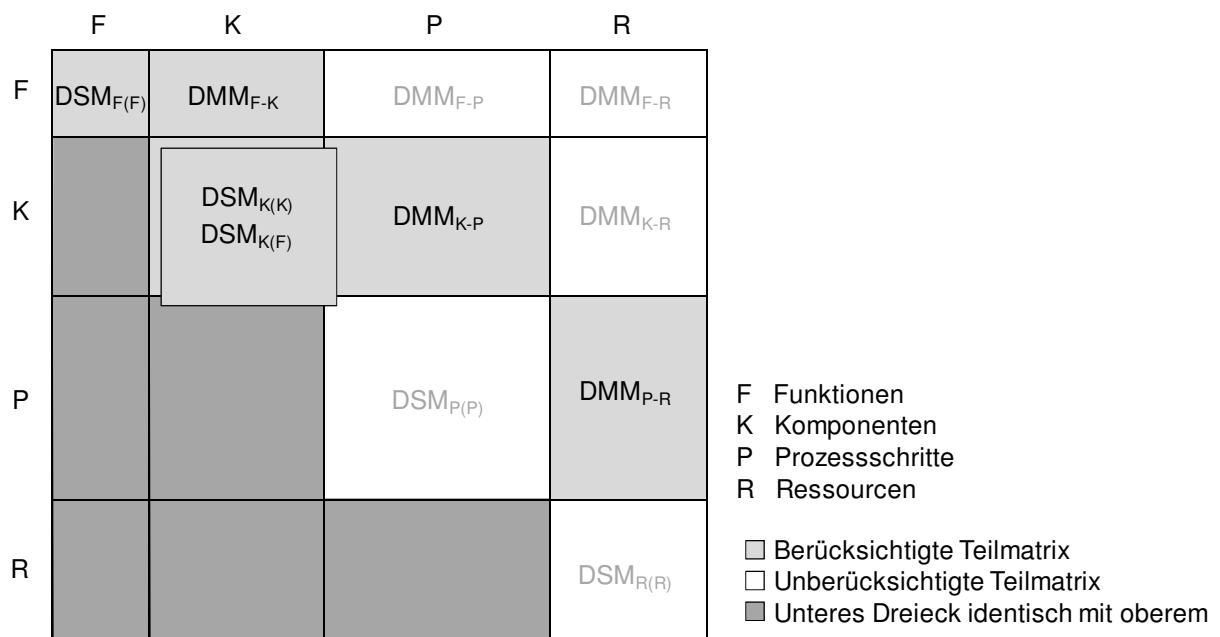


Bild 5-15: Berücksichtigte Teilmatrizen der gesamten Multiple-Domain Matrix

Bild 5-15 macht außerdem deutlich, dass es von einzelnen Teilmatrizen unterschiedliche Ausprägungen geben kann. Bereits vorgestellt und in Bild 5-15 abgebildet wurden die physikalische und die funktionale Ausprägung der Komponentenstruktur $DSM_{K(K)}$ und $DSM_{K(F)}$. Diese Unterscheidung kann als **unterschiedlicher Blickwinkel** auf eine Struktur verstanden werden. Denn bei den beiden Strukturen interessieren den Betrachter jeweils unterschiedliche Verknüpfungscharakteristika. Im Rahmen des hier vorgestellten Leitfadens werden lediglich unterschiedliche Blickwinkel auf die Komponentenstruktur berücksichtigt. Bis auf die native $DSM_{K(K)}$ sind alle weiteren berücksichtigten Ausprägungen der Komponentenstruktur zu Analysezielen berechnet.

Weitere unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen Teilmatrizen ergeben sich aus der Möglichkeit der **Konzeptvariantenbildung**. So wurde in Kapitel 5.1 anhand der dynamischen Lidarnachführung gezeigt, dass beispielsweise auf Basis ein und der selben Funktionsstruktur unterschiedliche Ausprägungen der Komponentenstruktur entwickelt werden können.

nen, da zu jeder Teilfunktion unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten existieren. Somit ergeben sich Varianten der folgenden Matrizen: DMM_{F-K} , $DSM_{K(K)}$ und $DSM_{K(F)}$. Eine alternative Komponentenstruktur bedarf zu ihrer Realisierung anderer Prozessschritte und verbraucht mit großer Wahrscheinlichkeit auch andere Ressourcen. Auf diese Weise entstehen Varianten der Matrizen DMM_{K-P} und DMM_{P-R} . Und natürlich kann die Konzeptvariantenbildung schon auf funktionaler Ebene beginnen. So findet man in Kapitel 5.1 gleich zu Beginn die Beschreibung konzeptionell unterschiedlicher Funktionsmodelle der Lidar-Nachführung. Resultat sind unterschiedliche Ausprägungen der $DSM_{F(F)}$ und aller nachfolgender Matrizen.

Neben diesen zeitlich parallel existierenden Strukturvarianten ergibt sich im Zuge des disziplinübergreifenden Systementwurfs zwangsläufig ein weiterer Variantentyp. So erfolgt mit Fortschreiten der Entwicklung eine **Konkretisierung** einzelner Teilstrukturen. Um eine durchgängige Modellierung und Informationshandhabung zu gewährleisten darf die Ablösung einer Struktur durch eine Aktualisierung nicht dazu führen, dass der Zusammenhang zu den restlichen Teilmodellen verloren geht. Aus diesem Grund erfolgt im hier vorgestellten Informationsmodell die Anbindung der aktualisierten Struktur an ihren Vorgänger über eine erweiterte Form der ΔDSM nach DE WECK [2007].

Mittels der von DE WECK [2007] vorgestellten ΔDSM kann eine DSM_{t2} zum Zeitpunkt $t2$ aus der DSM_{t1} zum Zeitpunkt $t1$ ($t1 < t2$) durch folgenden Zusammenhang bestimmt werden:

$$DSM_{t2} = DSM_{t1} + \Delta DSM$$

Auf diese Weise können die folgenden Veränderungen zwischen DSM_{t1} und ihrer Aktualisierung DSM_{t2} dargestellt werden:

- Erzeugen von Elementen
- Entfernen von Elementen
- Erzeugen von Relationen
- Entfernen von Relationen

Aus einer ΔDSM nicht nachvollzogen werden kann die Zusammenfassung bzw. die Aufspaltung von Elementen. Dies jedoch sind gängige Schritte im Zuge der Ausarbeitung und Konkretisierung einer Struktur. Ein weiterer Nachteil der ΔDSM besteht darin, dass die DSM_{t1} bereits aus den gleichen Elementen aufgebaut sein muss wie ihre Aktualisierung DSM_{t2} . Das heißt es müssen Platzhalter für später hinzu kommende Elemente vorgesehen werden. Somit müssten bereits zu Beginn alle Eventualitäten der Strukturweiterung vorausgesehen werden. Dies ist jedoch nicht realisierbar und zudem entstehen bereits zu Beginn der Entwicklung unnötig umfangreiche Matrizen.

Aus diesem Grund erweitern EBEN ET AL. [2008] die Anwendung der ΔDSM um eine Mapping DMM MAP . Die MAP übernimmt die Aufgabe Veränderungen der Systemelemente abzubilden und ist dabei in der Lage neben dem Erzeugen und Entfernen von Elementen auch das

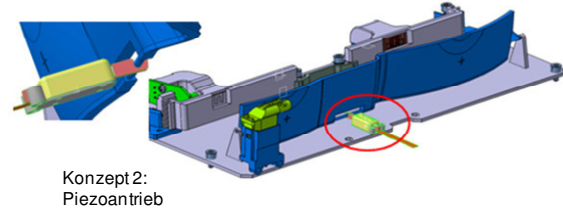
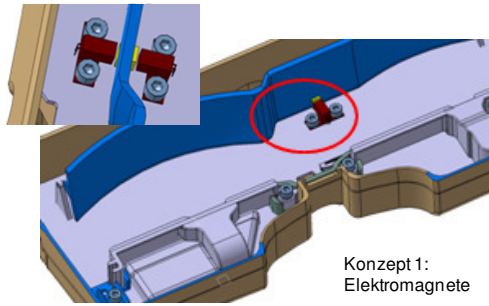
- Zusammenfassen von Elementen und das
- Aufspalten von Elementen

abbilden. In der MAP werden die alten Systemelemente in Zeilen den neuen Systemelementen in Spalten gegenüber gestellt. Die Abbildung des Erzeugens und Entfernen von Relationen erfolgt durch die ΔDSM . Somit lautet der erweiterte Zusammenhang zur Bestimmung von DSM_{t_2} wie folgt:

$$DSM_{t_2} = MAP_1^T \cdot DSM_{t_1} \cdot MAP_1 + \Delta DSM$$

Bild 5-16 zeigt die Anwendung dieser Formel auf die Komponentenstruktur der dynamischen Lidarnachführung. Ausgehend von der bisher dargestellten Lösung des Spiegelantriebs über zwei Elektromagnete und einen am Spiegel befestigten Stator erfolgen die nun folgenden Überarbeitungen. So wird die dreiteilige Antriebslösung durch einen einteiligen Piezoantrieb ersetzt. Dies bedeutet die Zusammenfassung von drei Elementen zu einem. Zusätzlich wird die Integration einer bisher vernachlässigten Energieversorgung vorgesehen. Dies beutet das Einfügen eines neuen Elements. Die Umsetzung beider Schritte in der Mapping DMM MAP_1 bzw. der ΔDSM sind aus Bild 5-16 ersichtlich.

Es ändern sich jedoch nicht nur die intra-Domain Strukturen über die Zeit der Entwicklung. Auch die inter-Domain Strukturen müssen angepasst werden. So führt die beschriebene Überarbeitung der Komponentenstruktur zu einer zwangsläufigen Veränderung der notwendigen Prozessschritte. Dies bedeutet eine Änderung der DMMK-P. Um diese ebenfalls in der Notation der Multiple-Domain Matrix abbilden zu können wurde das Prinzip nach EBEN ET AL. [2008] für DSMs im Rahmen dieser Dissertation auf die zeitliche Veränderung von DMMs übertragen.



DSM_{K(K)|1}

Komponenten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Leiterplatte	Gehäuse
Quelle	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Empfänger	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Kontrolleinheit	3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Spiegel	4	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
Lager r	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Zapfen r	6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Lager l	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Zapfen l	8	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Stator	9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
Magnet v	10	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Magnet h	11	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Leiterplatte	12	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1
Gehäuse	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

DSM_{K(K)|2}

Komponenten	1	2	3	4	5	6	7	8	9-11	12	13	14	
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Piezoantrieb	Leiterplatte	Gehäuse	Energieversorg.	
Quelle	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
Empfänger	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
Kontrolleinheit	3	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1
Spiegel	4	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
Lager r	5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Zapfen r	6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Lager l	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Zapfen l	8	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Piezoantrieb	9-11	0	0	2	1	0	0	0	0	4	2	0	1
Leiterplatte	12	1	1	1	0	1	0	1	0	2	0	1	1
Gehäuse	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Energieversorg.	14	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

$$DSM_{K(K)|2} = MAP_1^T \cdot DSM_{K(K)|1} \cdot MAP_1 + \Delta DSM$$

MAP₁

Komponenten	1	2	3	4	5	6	7	8	9-11	12	13	14
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Piezoantrieb	Leiterplatte	Gehäuse	Energieversorg.
Quelle	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Empfänger	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kontrolleinheit	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Spiegel	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Lager r	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Zapfen r	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Lager l	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Zapfen l	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Stator	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Magnet v	10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Magnet h	11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Leiterplatte	12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Gehäuse	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

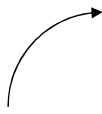
ΔDSM

Komponenten	1	2	3	4	5	6	7	8	9-11	12	13	14
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Piezoantrieb	Leiterplatte	Gehäuse	Energieversorg.
Quelle	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Empfänger	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Kontrolleinheit	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Spiegel	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager r	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zapfen r	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager l	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zapfen l	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Piezoantrieb	9-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Leiterplatte	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Gehäuse	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energieversorg.	14	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Bild 5-16: Verknüpfung zweier Komponentenstrukturen mittels der Mapping DMM MAP₁ und der ΔDSM

Bild 5-17 zeigt auf der linken Seite das Ergebnis der Multiplikation von MAP_1^T mit DMM_{K-P1} . Aus der entstehenden Matrix wird ersichtlich, dass zum einen eine neue Komponente hinzugefügt wurde und zum anderen eine Zusammenfassung von mindestens drei Komponenten erfolgt ist.

Der Prozessbaustein *Stator/Magnete zukaufen* ist durch den Einsatz des Piezoantriebs hinfällig geworden. Aus diesem Grund kann dieser Schritt eliminiert werden. Dafür muss jedoch ein Prozessbaustein *Piezoantrieb zukaufen* hinzugefügt werden. Im Zuge der Überarbeitung erfolgt außerdem eine Zusammenfassung der Prozessschritte *Leiterplatte bestücken* und *Leiterplatte verdrahten*, da diese aufgrund der Anschaffung eines neuen Bestückungsautomaten nun in einem Schritt erledigt werden können. Diese Informationen sind aus MAP_2 heraus zu lesen.



		Prozessschritte																			
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV-XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	
	Quelle	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
	Empfänger	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
	Kontrolleinheit	3	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
	Spiegel	4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	Lager r	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	Zapfen r	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	Lager l	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	Zapfen l	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
Komponenten	Piezoantrieb	9-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	
	Leiterplatte	12	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	1	1	0	
	Gehäuse	13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
	Energieversorg.	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Bild 5-18: Die Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten des piezogetriebenen Konzeptes

Bild 5-18 zeigt abschließend das Ergebnisse der Multiplikation der Matrix aus Bild 5-17 mit MAP_2 und anschließender Addition mit einer ΔDMM . Die ΔDMM erzeugt im dargestellten Fall lediglich die Verbindung zwischen *Piezoantrieb* und *Piezoantrieb zukaufen*.

In Bild 5-19 sind die drei beschriebenen Möglichkeiten der Variantenbildung von Teilmatrizen innerhalb der verwendeten Multiple-Domain Matrix

- Unterschiedliche Blickwinkel zur umfassenden Analyse
- Lösungsalternativenbildung
- Konkretisierung im Laufe der Entwicklung

nochmal in ihrem Zusammenhang dargestellt. Dabei fällt auf, dass sich ganz oben in der Abbildung ein ΔDSM findet, deren Funktion bisher noch nicht erklärt wurde. Mit ihrer Hilfe erfolgt der monetäre Vergleich zweier Konzeptvarianten zur Unterstützung der den disziplinübergreifenden Systementwurf abschließenden Bewertung. Bevor auf diesen Punkt näher eingegangen werden kann, muss zunächst einmal grundsätzlich gezeigt werden, auf welche Art Kosten in einer Multiple-Domain Matrix modelliert und verarbeitet werden können.

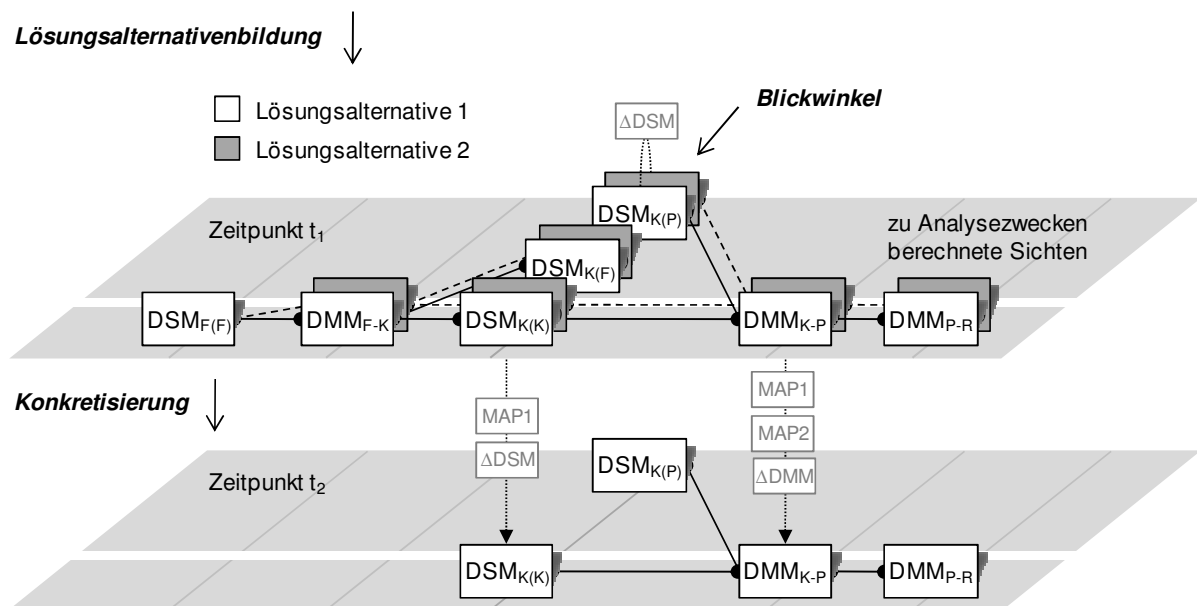


Bild 5-19: Möglichkeiten der Variantenbildung von Teilmatrizen

Bei der Integration von Kosten in die MDM Notation sind nach BIEDERMANN ET AL. [2007] zwei wichtige Aspekte zu berücksichtigen. So darf die Integration numerischer Attribute – in diesem Fall Kosten – die bisherige Strukturinformation eines Netzwerks nicht verändern. Ansonsten würden die Ergebnisse von Strukturanalysen verfälscht und damit unbrauchbar. Außerdem müssen die Kosten über alle Teilstrukturen hinweg konsistent bleiben. Das heißt, die Gesamtsumme darf trotz aller durchzuführenden Matrixberechnungen nicht verändert werden. Diese Anforderungen können mit dem hier vorgestellten Ansatz erfüllt werden.

Kosten entstehen durch den Verbrauch von Ressourcen. Jede Ressource hat dabei einen Kostensatz. So werden beispielsweise für einen Mitarbeiter der Fertigung 40 EUR/h angesetzt³². In MDM-Notation werden die Kostensätze jeder Ressource auf der Diagonale der $DSM_{R(R)}$ abgebildet. Da die Felder außerhalb der Diagonalen unbesetzt bleiben entsteht eine so genannte Diagonalmatrix. Da die Diagonale auch als Vektor \vec{r} aufgefasst werden kann, wird die Diagonalmatrix als $diag \vec{r}$ bezeichnet. Bild 5-20 zeigt dieses Vorgehen für einen Ausschnitt der Prozessschritte zur Realisierung der dynamischen Lidarnachführung.

Jeder Prozessschritt verursacht einen gewissen Ressourcenverzehr. Dieser drückt aus wie viel einer Ressource durch den Prozessschritt beansprucht wird. So kann beispielsweise ein Prozessschritt den Mitarbeiter der Fertigung für 12 min in Anspruch nehmen. Der festzuhaltende Ressourcenverzehr wäre also 12 min bzw. 0,2 h. Die resultierenden Kosten ergeben sich aus der Multiplikation des Ressourcenverzehrs mit dem Kostensatz. Im Beispiel des Mitarbeiters der Fertigung also 8 EUR (0,2 h mal 40 EUR/h). Die Abschätzung des Ressourcenverzehrs stellt in frühen Phasen eine besondere Herausforderung dar. Auf welche Weisen diese Abschätzung im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs unterstützt werden kann, wird im nachfolgenden Kapitel 5.4 beschrieben. Modelliert wird der geschätzte Ressourcenverzehr wie in Bild 5-20 gezeigt in der DMM_{P-Rs} . Der Index s kennzeichnet in der Folge alle Teilmatrizen bzw. Vektoren, die Schätzwerte enthalten. Die Berechnung der Schätzkosten der Prozessschritte \vec{p}_s erfolgt mittels folgender Formel:

$$\vec{p}_s = DMM_{P-Rs} \cdot \vec{r} = (40, 13, 7, 8, 20, 10)^T$$

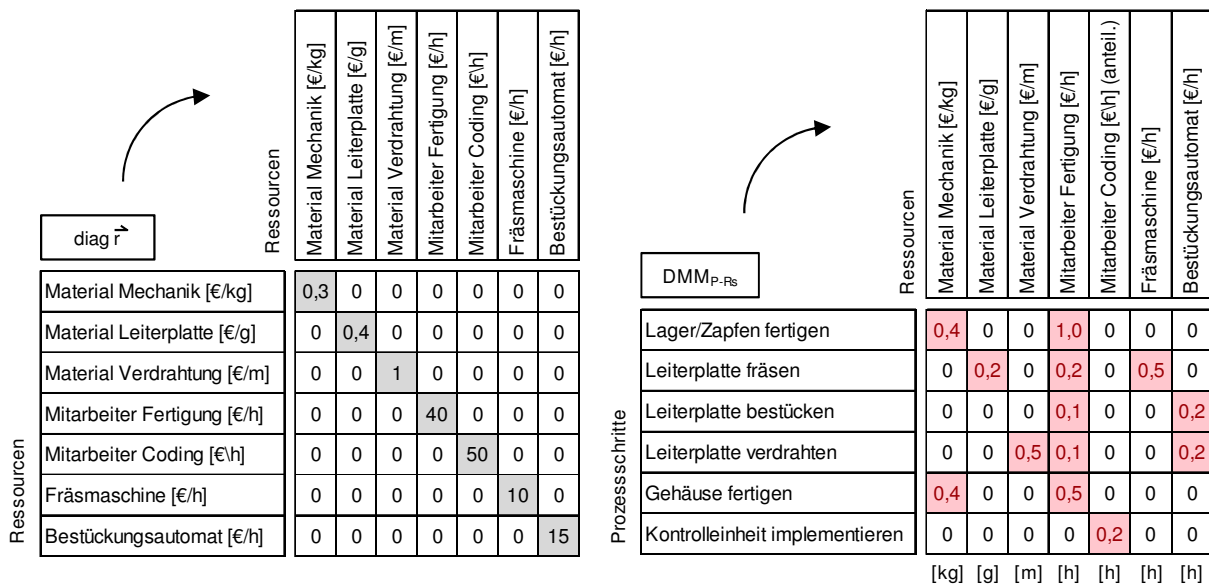


Bild 5-20: Berechnung der Prozessschätzkosten aus der Schätzung des Ressourcenverzehrs

Die Ausgangsbasis für Kostenanalysen und Kostenoptimierungsansätze ist im Rahmen des vorgestellten Leitfadens die Komponentenebene. Aus diesem Grund müssen die ermittelten

³² Alle in diesem Kapitel aufgeführten Kosten sind fiktiv und dienen rein der Illustration des entwickelten Ansatzes.

Prozesskosten auf die Komponenten umgelegt werden. Aufgrund der modellierten Anbindung von Prozessschritten an Komponenten ist dies auch aufwandsarm möglich. Prinzipiell wird hierfür die Verknüpfung von Komponenten aufgrund ihrer gemeinsamen Bearbeitung in einem Prozessschritt berechnet. Dies erfolgt analog zur Berechnung der Komponentenvernetzung aufgrund gemeinsamer Funktionserfüllung. Allerdings sind nun nicht nur die strukturellen Zusammenhänge zu berechnen. Die Verrechnung der Kosten muss, unter Beachtung der auf der vorherigen Seite formulierten Anforderungen, in die bereits vorgestellten Formeln integriert werden.

Analog zur Modellierung der Kostensätze \vec{r} erfolgt die Modellierung der Schätzkosten der Prozessschritte \vec{p}_s als Diagonalmatrix $diag \vec{p}_s$ [BRAUN ET AL. 2008] (Bild 5-21). Zusätzlich werden Informationen zum prozentualen Beitrag der Prozessschritte zu den einzelnen Komponenten benötigt. Diese werden in der DMM_{K-Pg} abgebildet. Der Index g kennzeichnet in der Folge Teilmatrizen, die Gewichtungen enthalten. Die Kosten der einzelnen Komponenten erhält man mittels folgender Formel:

$$DSM_{K(P)S} = (DMM_{K-Pg} \cdot diag \vec{p}_s) \cdot DMM_{K-Pg}^T$$

Die einzelnen Matrizen sowie das Ergebnis der Berechnung sind in Bild 5-21 dargestellt. Die Schätzkosten einer Komponente ergeben sich aus der zugehörigen Zeilensumme der Matrix $DSM_{K(P)S}$. Aus dieser kann man zusätzlich noch strukturelle Informationen ablesen. So ist intuitiv erkennbar, welche Komponenten sich einen oder mehrere Prozessschritte teilen. Im dargestellten Beispiel teilen sich die *Lager* und *Zapfen* einen oder mehrere Prozessschritte zu gleichen Teilen. Alle weiteren Komponenten sind aus Prozesssicht voneinander unabhängig.

Das Vorgehen zur Berechnung der Komponentenzielkosten aus den Funktionszielkosten folgt dem gleichen Prinzip wie die beschriebene Berechnung der Komponentenschätzkosten aus den Prozesskosten. Hierzu benötigt man neben den Funktionszielkosten, die als Vektor \vec{f}_z oder als Diagonalmatrix $diag \vec{f}_z$ modelliert werden, den prozentualen Beitrag der Komponenten zu den einzelnen Funktionen in Form der DMM_{F-Kg} . Der Index z kennzeichnet in der vorliegenden Arbeit alle Teilmatrizen bzw. Vektoren, die Zielkostenwerte enthalten.

Die Berechnung der quantifizierten $DSM_{K(F)z}$ erfolgt dann mittels folgender Formel:

$$DSM_{K(F)z} = DMM_{F-Kg}^T \cdot (diag \vec{f}_z \cdot DMM_{F-Kg})$$

Gezeigt wurde ein sehr stringentes Vorgehen zur Ermittlung der Komponentenschätzkosten auf Basis von Kostensätzen und Ressourcenverzehr. In der Realität jedoch wird man gerade in frühen Phasen eine aktivitätsorientierte Kostenschätzung nur für einzelne, besonders aufwändige Prozessschritte durchführen. Ansonsten wird man die Komponentenkosten direkt schätzen, oder, noch abstrakter, Funktionskosten schätzen (Kapitel 5.4). Der hier vorgestellte Ansatz der Informationshandhabung ist darauf ausgerichtet diese „Mischschätzung“ handzuhaben. Zur Verdeutlichung dieser Flexibilität wird an dieser Stelle auf ein sehr einfaches, abstraktes Beispiel zurück gegriffen, da selbst die stärkste Vereinfachung der dynamischen Lidarnachführung noch zu umfangreich wäre um an dieser Stelle übersichtlich und verständlich zu bleiben.

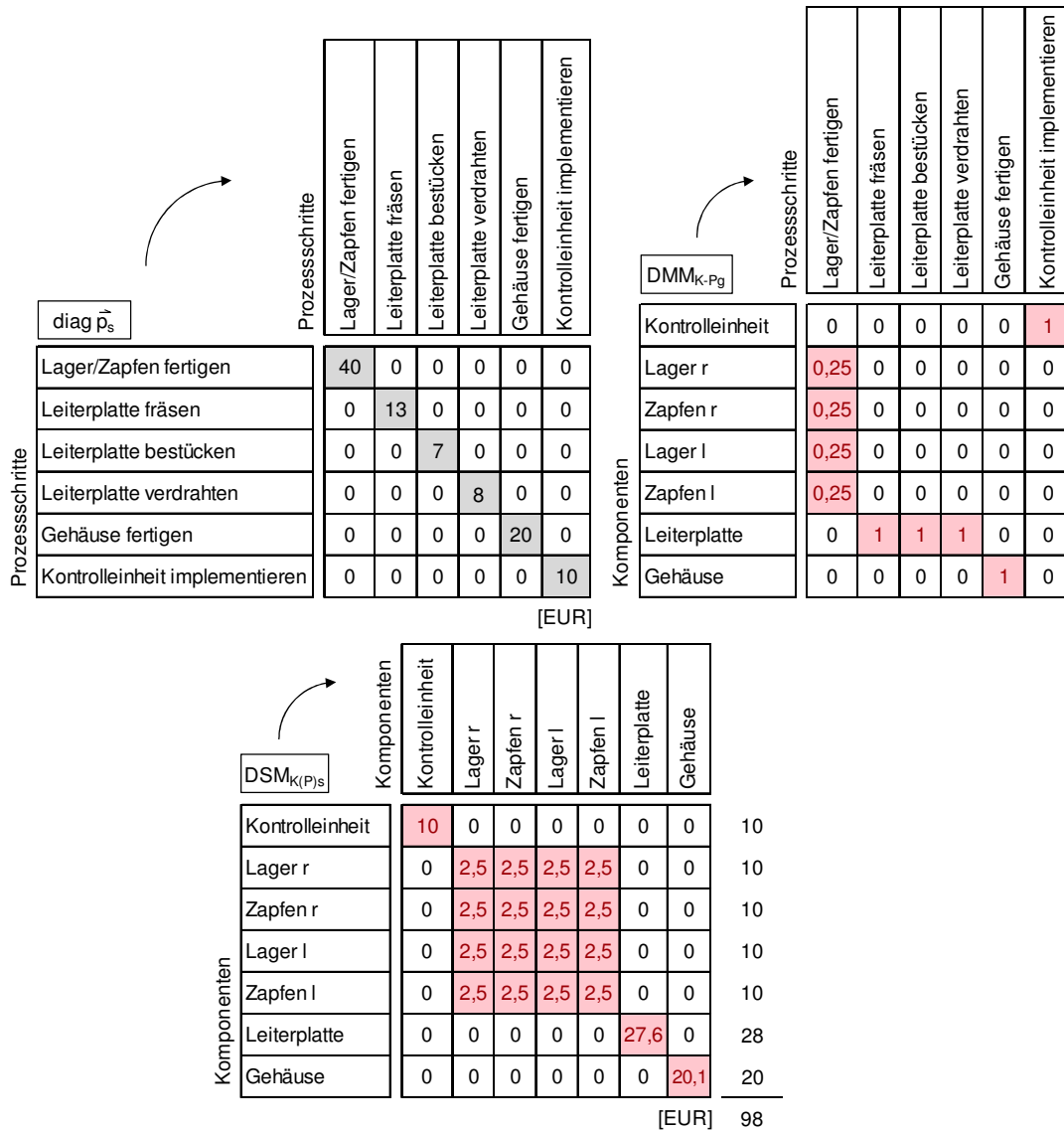


Bild 5-21: Umrechnung der Prozessschätzkosten in Komponentenschätzkosten

Das Beispielsystem ist aufgebaut aus den Funktionen *a-b*, den Komponenten *A-D* und den Prozessschritten *1-5*. Diese sind untereinander wie links in Bild 5-22 gezeigt vernetzt. Die Kosten der unterstrichenen Elemente können direkt geschätzt werden. Die Schätzergebnisse sind bereits in der nebenstehenden MDM eingetragen. Außerdem erkennt man in dieser den prozentualen Beitrag der Komponenten zu den geschätzten Funktionen sowie den prozentualen Anteil der geschätzten Prozessschritte an den Komponenten. Berechnet man nun $DSM_{K(F)S}$ und $DSM_{K(P)S}$ mit den beschriebenen Formeln und addiert sie zu $DSM_{K(K)S}$ bzw. $diag \vec{k}_s$, so erhält man die in Bild 5-22 links unten gezeigte $DSM_{K(F/K/P)S}$. Aus dieser sind nun die Schätzkosten der einzelnen Komponenten erkennbar:

$$DSM_{K(F/K/P)S} = DSM_{K(F)S} + diag \vec{k}_s + DSM_{K(P)S}$$

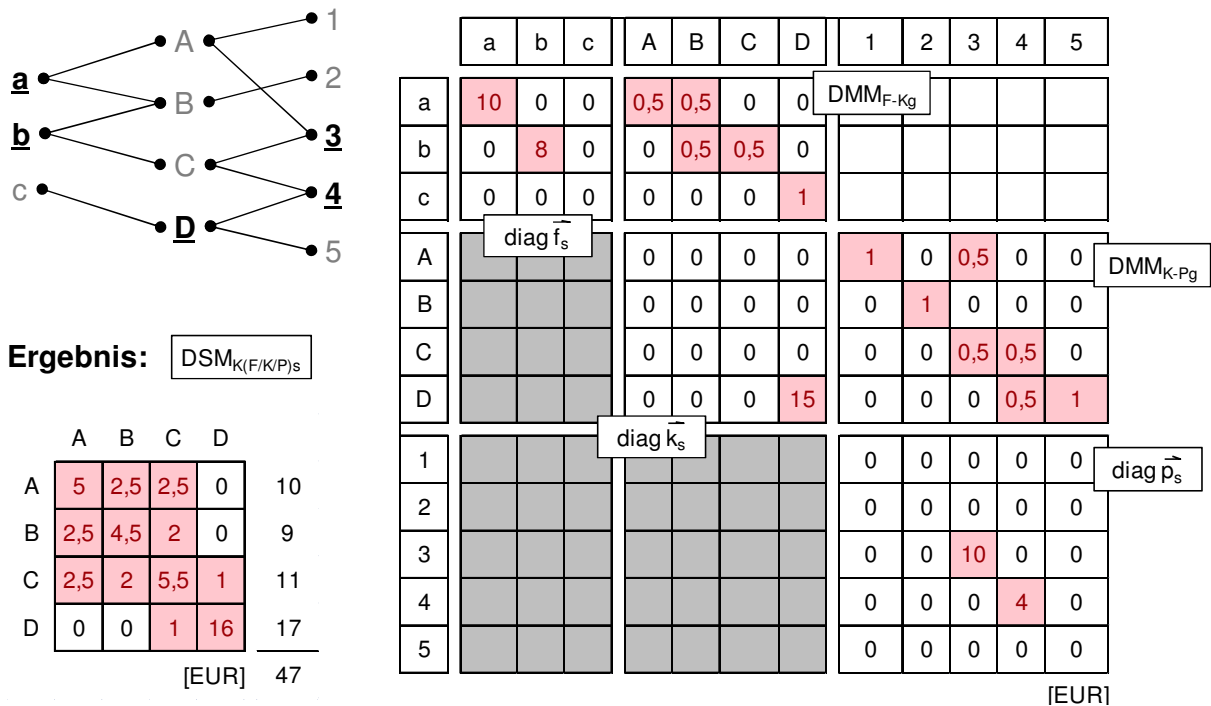


Bild 5-22: Mischschätzung von Funktions-, Komponenten- und Prozesskosten

Mit Hilfe der beschriebenen „Mischschätzung“ können Schnittstellenkosten explizit berücksichtigt werden. Das heißt Prozessschritte, die beispielsweise aufwändige Integrations- und Testschritt beschreiben, können abgebildet und in die Gesamtschätzung integriert werden. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass Produktstrukturen unterschiedlicher Ausprägung gerade in Hinblick auf Test und Integration deutlich unterschiedliche Kosten verursachen. Dies wird in Kapitel 5.5 noch deutlich gezeigt.

Zu berücksichtigen ist jedoch auch, dass nach der Addition der drei Repräsentationsarten der Komponentenstruktur die strukturelle Analysierbarkeit der daraus resultierenden $DSM_{K(F/K/P)_S}$ nicht mehr gegeben ist. Diese vereint nun für Analyseverfahren untrennbar drei Blickwinkel auf ein und dieselbe Struktur. Damit ist eine Interpretation von Strukturanalysen dieser speziellen DSM nicht mehr möglich.

Da nun gezeigt wurde, wie Kosten in den unterschiedlichen Teilmatrizen abgebildet und verrechnet werden können, kann nun zum Abschluss dieses Kapitels noch gezeigt werden, wie der monetäre Vergleich von Konzeptvarianten mit dem erarbeiteten Konzept der Informationshandhabung zu unterstützen ist. Als Grundlage dient an dieser Stelle wiederum die von DE WECK [2007] vorgestellte ΔDSM . Diese wird um eine Quantifizierung erweitert um die Unterschiedskosten zweier Konzeptvarianten abbilden zu können. Verglichen werden die Matrizen $DSM_{K(P)1s}$ und $DSM_{K(P)2s}$. Diese bilden jeweils die durch die Prozessschritte verursachten (Schätz-)kosten der einzelnen Konzepte ab. Die Matrizen können sich durch die Anzahl und Art der abgebildeten Komponenten unterscheiden. Dem Prinzip von DE WECK [2007] folgend werden sie jedoch für den Vergleich so erweitert, dass sie sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau gleichen, also dieselben Komponenten umfassen. Dem entsprechend bleiben die Zellen

der entsprechenden Zeilen und Spalten bei der einen bzw. der anderen Matrix unbesetzt. Die zugehörige ΔDSM berechnet sich nach folgender Formel:

$$\Delta DSM_{K(P)1/2s} = DSM_{K(P)2s} - DSM_{K(P)1s}$$

Bild 5-23 zeigt die resultierende $\Delta DSM_{K(P)1/2s}$ für das Erklärungsbeispiel der dynamischen Lidarnachführung. Verglichen wurden die unterschiedlichen Konzepte aus Bild 5-16 und ihre Prozesse aus Bild 5-17 und Bild 5-18. Eindeutig ablesbar aus der $\Delta DSM_{K(P)1/2s}$ ist die Kostenwirkung des Austausches der dreiteiligen elektromagnetischen Lösung mit der einteiligen piezogetriebenen Lösung. Des Weiteren erkennt man auch die kostensenkende Wirkung der Prozessmodifikation bei der Herstellung der Leiterplatte. Hier wurden von Variante 1 zu Variante 2 die beiden Schritte *Leiterplatte bestücken* und *Leiterplatte verdrahten* zusammengefasst. Somit ist das piezogetriebene Konzept trotz des Hinzufügens der zuvor vernachlässigten Energieversorgung kostengünstiger als das elektromagnetisch betriebene Konzept.

$\Delta DSM_{K(P)1/2s}$		Komponenten														Unterschiedskosten der Komponenten [EUR]	
		Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Piezoantrieb	Leiterplatte	Gehäuse		Energieversorg.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	9-11	12	13	14	
Quelle	1	0,14	0,14	0,24	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,27	-0,27	0,41	0,14	0,06	0,17	0,92
Empfänger	2	0,14	0,14	0,24	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,27	-0,27	0,41	0,14	0,06	0,17	0,92
Kontrolleinheit	3	0,24	0,24	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,87	-0,87	1,11	0,24	0,06	0,17	0,54
Spiegel	4	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,12	0,17	0,06	0,06	0,17	0,54
Lager r	5	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,12	0,17	0,06	0,06	0,17	0,54
Zapfen r	6	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,12	0,17	0,06	0,06	0,17	0,54
Lager l	7	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,12	0,17	0,06	0,06	0,17	0,54
Zapfen l	8	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,12	0,17	0,06	0,06	0,17	0,54
Stator	9	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,52	-0,92	-0,92	0,00	-0,12	-0,12	0,00	-3,54
Magnet v	10	-0,27	-0,27	-0,87	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,92	-1,87	-1,87	0,00	-0,27	-0,12	0,00	-7,04
Magnet h	11	-0,27	-0,27	-0,87	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,92	-1,87	-1,87	0,00	-0,27	-0,12	0,00	-7,04
Piezoantrieb	9-11	0,41	0,41	1,11	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	7,41	0,41	0,17	0,17	10,96
Leiterplatte	12	0,14	0,14	0,24	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,27	-0,27	0,41	-4,36	0,06	0,17	-3,58
Gehäuse	13	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,12	0,17	0,06	0,06	0,17	0,54
Energieversorg.	14	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,17	0,17	0,17	2,08
Summe																	-2,50

Bild 5-23: Unterschiedskosten der Konzepte 1 und 2 aus Bild 5-16

Auf Basis der einzelnen Matrizen $DSM_{K(P)1s}$ und $DSM_{K(P)2s}$ könnten zusätzliche Anstöße für Optimierungsmöglichkeiten beider Konzepte erarbeitet werden. Das hierfür anzuwendende Vorgehen wird in Kapitel 5.5 beschrieben. Im sich hier anschließenden Kapitel 5.4 wird nun zunächst gezeigt, wie die Schätzung von Funktions-, Komponenten- und Prozesskosten im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs unterstützt werden kann.

5.4 Methodische Unterstützung der Kostenfrüherkennung

In Kapitel 3.3 wurden zahlreiche Kurzkalkulationsverfahren der mechatronischen Disziplinen Maschinenwesen, Elektrotechnik und Informationstechnik vorgestellt. In diesem Zusammenhang erfolgte auch bereits eine erste Klassifikation in *grundlegende Verfahren*, sowie *Verfahren mit einer oder mehreren Einflussgrößen*. Außerdem wurde festgestellt, dass die Verfahren bisher nur disziplinspezifischen Einsatz finden und eine disziplinübergreifende Unterstützung der Kostenschätzung während des Systementwurfs noch nicht konzipiert wurde.

Dieses Kapitel beschreibt nun die erarbeitete methodische Unterstützung der Kostenanalyse im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs mechatronischer Produkte und ordnet sie in die bereits beschriebenen Arbeiten ein. Dabei war es nicht das Ziel die in Kapitel 3.3 beschriebenen disziplinspezifischen Methoden zu ersetzen. Diese finden jedoch zu meist erst in späteren Phasen sinnvollen Einsatz. Entwickelt werden sollte eine aufwandsoptimierte Möglichkeit der Kostenschätzung in frühen Phasen, die für alle beteiligten Disziplinen des Systementwurfs zugänglich ist und dabei sowohl auf Funktions- als auch auf Komponenten- und Prozessebene einsetzbar ist. Zu berücksichtigen war außerdem, dass die in frühen Phasen aufgestellten Kostenmodelle auch in der anschließenden Phase des disziplinspezifischen Entwurfs und der Ausarbeitung weiterverwendbar und erweiterbar sind.

Grundsätzlich bieten sich zwei Möglichkeiten der Aufgabenstellung zu begegnen. Die erste besteht darin, die bekannten Methoden unverändert beizubehalten und eine Art Methodenbaukasten zu entwerfen. Eine disziplinübergreifende Unterstützung kann dabei durch die Erarbeitung von Kombinationsmöglichkeiten erreicht werden. Vorstellbar wären situationspezifische Einsatzszenarios unterschiedlicher Methodenkombinationen. Da sich die vorliegende Dissertation nicht auf die Kostenschätzung bestimmter Produkte beschränkt, wären die zu entwickelnden Einsatzszenarios dabei sehr allgemeingültig. Produkt- bzw. unternehmensspezifische Aspekte, wie sie zur Unterstützung der Methodenauswahl berücksichtigt werden sollten, könnten nicht integriert werden. Aus diesem Grund wurde die zweite Möglichkeit für diese Arbeit favorisiert. Diese sieht zunächst die Identifikation grundlegend unterschiedlicher Methodenklassen vor. Zu diesem Zweck muss die bisher vorliegende, sehr rudimentäre Klassifikation, weiter ausgebaut werden. Innerhalb der gebildeten Klassen ist dann die Allgemeingültigkeit bzw. die disziplinübergreifende Einsatzfähigkeit der Methoden zu überprüfen. Bereits breit einsetzbare Methoden sind wenn notwendig bzw. möglich weiter zu verallgemeinern und damit ihre Einsatzmöglichkeit auszuweiten. Auf diese Weise entstehen disziplinübergreifende *Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation*, die universell für unterschiedlichste Funktionen, Komponenten und Prozesse eines Systems einsetzbar sind.

Bei der Erweiterung der Klassifikation der recherchierten Kurzkalkulationsverfahren wird die Klasse der *grundlegenden Verfahren* nicht weiter aufgespalten und untersucht. Zwar sind die

Methoden von sehr unterschiedlichem Charakter, doch sind sie bereits so grundlegend, dass sie von vornherein allgemeingültig sind und somit auch bereits in allen Disziplinen verbreitet sind.

Bei der Kurzkalkulation über eine Einflussgröße berücksichtigen die zahlreichen recherchierten Verfahren aus Kapitel 3.3 jeweils sehr unterschiedliche Einflussgrößen. Dennoch ist das Prinzip, das hinter den einzelnen Methoden steht, immer das gleiche. So wird das primär kostentreibende Merkmal eines Produktumfangs (einzelne Komponenten, Baugruppen etc.) auf Basis von Untersuchungen bestehender Produkte identifiziert und über Regression ein formaler Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Merkmals und den Kosten des Produktumfangs bestimmt.

Grundlegende Unterschiede finden sich bei Verfahren, die mehrere Einflussgrößen berücksichtigen. Hier können drei Klassen gebildet werden: Funktionsorientierte, ergebnisorientierte sowie aktivitätsorientierte Verfahren.

Die *funktionsorientierten Verfahren* orientieren sich, wie ihr Name schon sagt, an der durch das Produkt zu erbringenden Funktionalität. Hier wurden in Kapitel 3.3 drei Verfahren vorgestellt. Jedes dieser Verfahren ist dabei einer der drei Disziplinen zugehörig. So wird das Function Costing im Umfeld des klassischen Maschinenwesens beschrieben [LI ET AL. 1993]. Das Concept Estimating [TAYLOR 1985, S.56FF] entstammt der Elektrotechnik und die Function Points sind eine Messgröße der Informationstechnik [GARMUS & HERRON 2001; JANTZEN 2007].

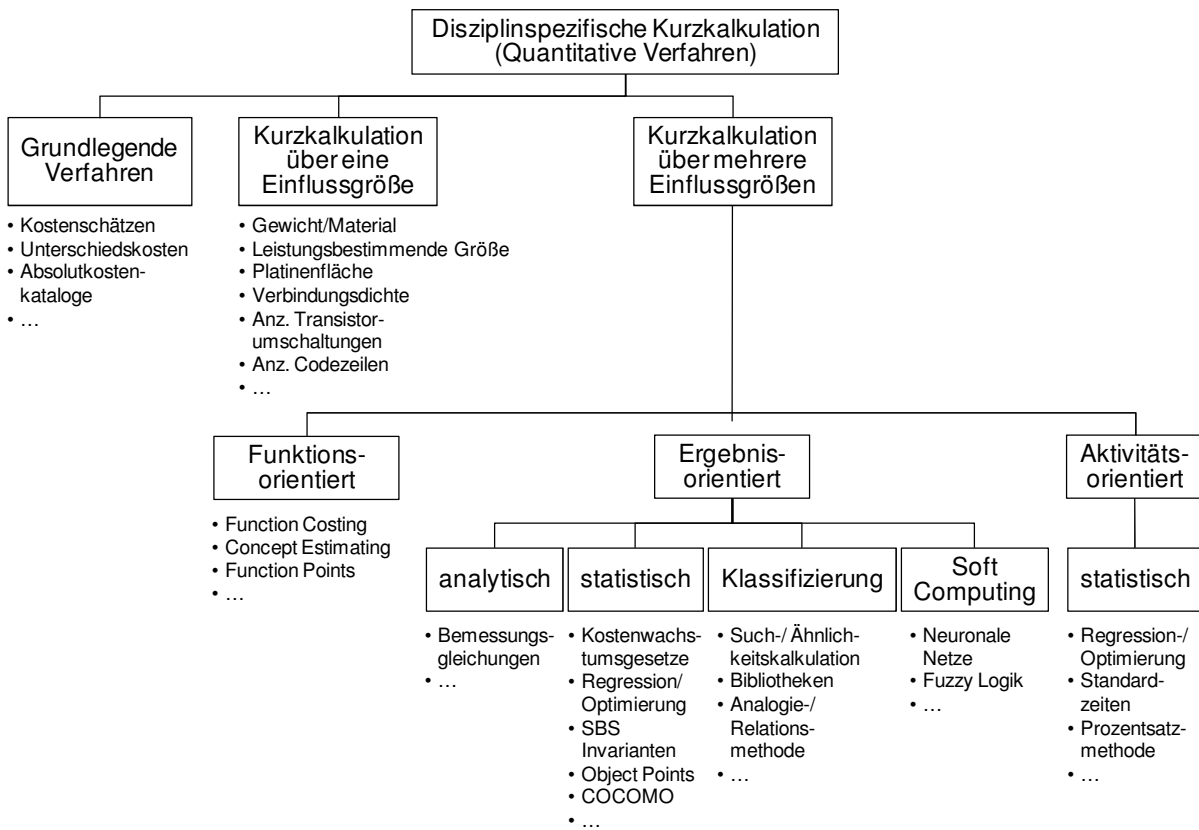


Bild 5-24: Klassifikation der analysierten Kurzkalkulationsverfahren

Ergebnisorientierte Verfahren orientieren sich bei der Kostenschätzung am Umfang bzw. der Ausprägung bestimmter Merkmale der zu erstellenden Leistung. Zu unterscheiden sind innerhalb der Gruppe der ergebnisorientierten Verfahren analytische und statistische Ansätze, Klassifizierungsverfahren sowie der Einsatz von Soft Computing Techniken.

Als analytisches, ergebnisorientiertes Verfahren wurden in Kapitel 3.3 die Bemessungsgleichungen vorgestellt [SCHOLL 1998, S.32, VDI 1997B]. Den statistischen Verfahren gemeinsam ist, dass sie auf der Durchführung von Regressionsanalysen beruhen. Dazu gehören die Kostenwachstumsgesetze [PAHL & RIEG 1984], die SBS Invarianten [AXELSSON 2000], die Object Points [SNEED 1994] und COCOMO [BOEHM ET AL. 2000]. Klassifizierungsverfahren arbeiten beispielsweise mit Bibliotheken [BAKSHI & GAJSKI 1997]. Auch die Such- bzw. Ähnlichkeitskalkulation [PICKEL 1989] und die Analogie- bzw. Relationsmethode [PASSINGER ET AL. 2003, SHEPPERD & SCHOFIELD 1997] gehören zu dieser Klasse. Von den Soft Computing Techniken kommen hauptsächlich Neuronale Netze [BECKER 1997, S.188, JØRGENSEN & SHEPPERD 2007, IDRI ET AL. 2004] und die Fuzzy Logik [ENDEBROCK 2000; LEIDICH ET AL. 2001; SCHUMANN 2001] zur Kostenschätzung in frühen Phasen zum Einsatz.

Die *aktivitätsorientierten Verfahren* orientieren sich an den zur Erstellung eines Produktes notwendigen Prozessschritten. Sie sind in der Regel statistisch angelegt und basieren auf der Durchführung von Regressionsanalysen. Besonders in der Elektrotechnik verbreitete Methoden sind dabei stark verwandt mit dem Activity Based Costing und sind dadurch mit sehr hohem Aufwand verbunden. Sie bewegen sich somit im Randbereich der „echten“ Kurzkalkulationsverfahren. Aufwandsärmere Ausprägungen aktivitätsorientierter Verfahren stellen die Schätzung mit Standardzeiten [TAYLOR 1985] und die Prozentsatzmethode [PINK ET AL. 2002] dar.

Bild 5-24 zeigt die soeben vorgestellte Klassifikation der Methoden aus Kapitel 3.3.3 im Überblick. Dabei ist zu erkennen, dass die einzelnen Klassen weitestgehend disziplinübergreifend sind und somit eine gute Ausgangsbasis für die Ableitung von *Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation* darstellen.

Allerdings können nicht alle Methoden, die einer Disziplin zugehörig sind, auf jeden Komponententyp dieser Disziplin angewendet werden. Außerdem sind die Grenzen zwischen Maschinenwesen und Elektrotechnik im Falle von Aktoren und Sensoren sehr fließend. Sie werden beide sowohl von Methoden des Maschinenwesens als auch der Elektrotechnik berücksichtigt. Doch macht es zum Beispiel keinen Sinn, zur Kostenschätzung des Piezo-Antriebs der automatischen Lidarnachführung aus den vorherigen Kapiteln die Gewichtskostenmethode anzuwenden. Deshalb erscheint eine Zuordnung der Verfahren zu Komponententypen deutlich sinnvoller als zu Disziplinen.

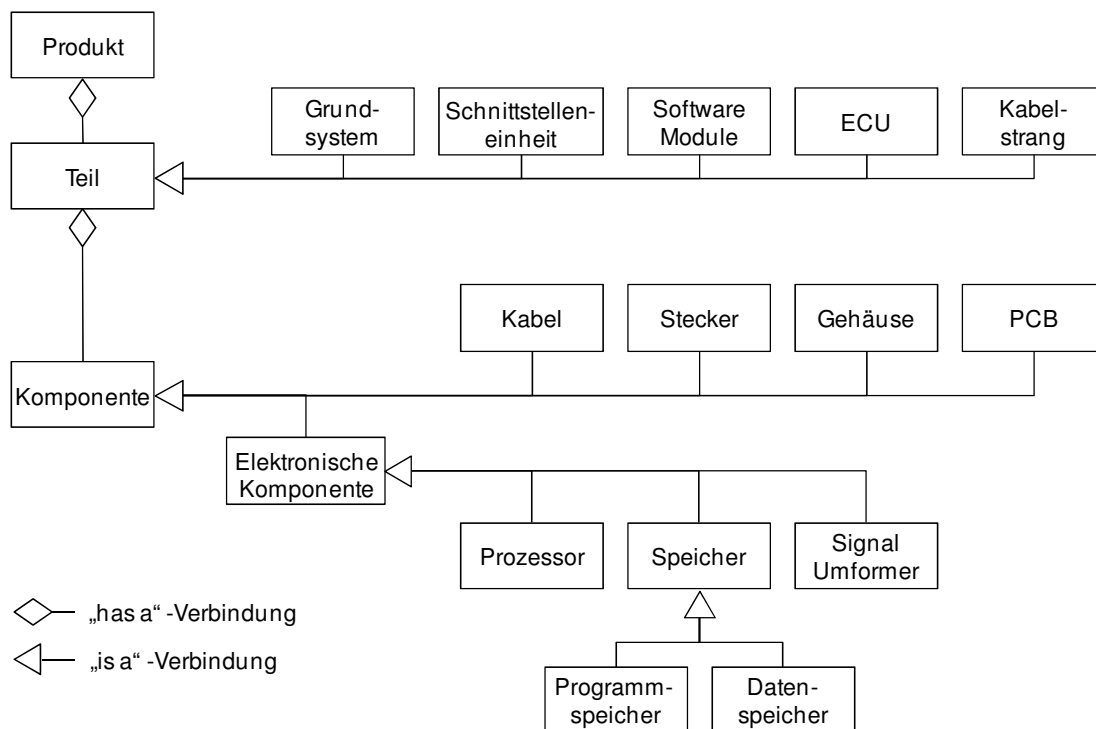


Bild 5-25: Erweiterte System Breakdown Structure [nach AXELSSON 2000]

Die Festlegung der Komponententypen erfolgte in dieser Arbeit in Anlehnung an die System Breakdown Structure (SBS) nach AXELSSON [2000], die auch bereits in Kapitel 3.3 vorgestellt wurde. Da diese Ausgangsstruktur nicht alle Komponenten eines mechatronischen Systems berücksichtigt, wurde sie entsprechend ergänzt.

Bild 5-25 und die darin dargestellten Elemente sind wie folgt zu verstehen: Ein *Produkt* ist aufgebaut aus einzelnen *Teilen*. Diese können zum einen Grundsystembestandteile oder auch Schnittstelleneinheiten, Softwaremodule, elektronische Kontrolleinheiten oder Kabelstränge sein. Grundsystembestandteile umfassen alle rein mechanischen Systemkomponenten. Sensoren und Aktoren werden als Schnittstelleneinheiten bezeichnet.

Ein *Teil* der SBS ist aus mehreren *Komponenten* aufgebaut. So besteht ein ECU aus einem Gehäuse, einem Prozessor, einem Programmspeicher, einem Datenspeicher, einem PCB sowie einer unbestimmten Anzahl von Signalumformern und Steckern [AXELSSON 2000].

		analytisch		statistisch				klassifizierend			Soft Computing	
Ergebnisorientierte Kurzkalkulation		Bemessungsgleichungen	Regressions- und Optimierungsverfahren	SBS Invarianten	Kostenwachstumsgesetz	Object Points	COCOMO 81 COCOMO II	Such-/Ähnlichkeitskalkulation	Bibliotheken	Analogie- und Relationsmethode	Neuronale Netze	Fuzzy Logik
Grundsystem		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Schnittstellenheit			<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Softwaremodule			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ECU	Gehäuse		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Stecker		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	PCB		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Prozessor		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Speicher		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Signalumformer		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kabelstrang	Kabel		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Stecker		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Originalveröffentlichung(en)
 Sinnvolle Übertragbarkeit/Ausweitung
 Identifizierte Basismethode

Bild 5-26: Analyse der ergebnisorientierten Kurzkalkulationsverfahren³³

Da unterschiedliche Veröffentlichungen eine Methode auf unterschiedliche Komponententypen anwenden bzw. unterschiedliche Komponententypen auf einmal behandeln gibt es keine eindeutige Zuordnung von Kurzkalkulationsverfahren und Komponententypen. Bild 5-26 zeigt einen Ausschnitt der vorgenommenen Gegenüberstellung. Mit Haken in Kästen gekennzeichnet sind Beziehungen, die direkt in der Literatur zu finden sind. So wird die Anwendung der Object Points bisher nur im Zusammenhang mit der Kostenschätzung von Softwaremodulen beschrieben.

Des Weiteren finden sich freistehende Haken in Bild 5-26. Diese kennzeichnen Kombinationen aus Kurzkalkulationsverfahren und Komponententyp bei denen die vorliegende Arbeit eine sinnvolle Übertragbarkeit unterstellt. So können beispielsweise durch die Anwendung der Object Points auch die Größe und somit die Kosten des (Programm-)speichers bestimmt werden.

Eine Gegenüberstellung in der beschriebenen Art erfolgte für alle berücksichtigten Kurzkalkulationsverfahren und Komponentenklassen³⁴. Auf diese Weise konnten diejenigen Methoden identifiziert werden, die die beste Übertragbarkeit aufweisen, also am universellsten anwendbar sind (Bild 5-27). Diese werden in der Folge als Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation bezeichnet.

³³ Die Quellen der Originalveröffentlichungen sind im Anhang 9.3 benannt.

³⁴ Die vollständige Aufstellung kann dem Anhang 9.3 entnommen werden.

		Eine Einflussgröße	Mehrere Einflussgrößen			
		Kurz kalkulation über eine leistungsbestimmende Größe	ergebnisorientiert	Such-/Ähnlichkeitskalkulation	funktionsorientiert	aktivitätsorientiert
Grundsystem		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Schnittstellenheit		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Softwaremodule		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ECU	Gehäuse	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
	Stecker	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	PCB	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Prozessor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Speicher	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Signalumformer	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Kabelstrang	Kabel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Stecker	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Originalveröffentlichung(en)
 Sinnvolle Übertragbarkeit/Ausweitung

Bild 5-27: Die fünf Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation

Für jede dieser fünf Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation wurde das Vorgehen bei der Vorbereitung und der individuellen Schätzung formuliert und Vor- und Nachteile identifiziert. Zusätzlich wurden Hilfsmittel angegeben, die den Methodeneinsatz unterstützen können und es wurde beschrieben wie die Drei-Punkt Schätzung zur Berücksichtigung von Schätzunsicherheiten in die einzelnen Methoden integriert werden kann. Diese Methodenbeschreibungen finden sich in übersichtlicher Form im Anhang der vorliegenden Arbeit.

Um die Auswahl eines Schätzverfahrens im Rahmen des disziplinübergreifenden Systementwurfs zu unterstützen reichen die Klassifikation mit den beschriebenen Verfahrensklassen und die Zuordnung zu Komponentenklassen nicht aus. Weitere Beurteilungskriterien müssen mit einbezogen werden und die fünf Basismethoden anhand derer verglichen werden.

Ausgewählt wurden elf Kriterien, die alle einen direkten Einfluss auf die Methodenanwendbarkeit haben. Anhand dieser Kriterien wurden dann die fünf Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation einander gegenübergestellt. Bild 5-28 zeigt das Ergebnis dieser Gegenüberstellung.

	Eine Einflussgröße		Mehrere Einflussgrößen		
			ergebnisorientiert	funktionsorientiert	aktivitätsorientiert
	Kurzkalkulation über eine leistungsbestimmende Größe	Regressions- und Optimierungsverfahren	Such-/Ähnlichkeitskalkulation	Function Costing	Regressions- und Optimierungsverfahren
Zahl der berücksichtigbaren Einflussgrößen	eine	nahezu unbegrenzt	begrenzt	begrenzt	nahezu unbegrenzt
Aufwand Vorbereitung	gering	mittel	hoch	mittel	hoch
Abhängigkeit von historischen Daten	ja	ja	ja	ja	ja
Aufwand individuelle Schätzung	gering	mittel	mittel	mittel	hoch
Aufwand Datenhandling	mittel	mittel	mittel	hoch	mittel
Aussagequalität, Belastbarkeit	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
Hinweis auf Konzeptoptimierung	indirekt	indirekt	direkt	indirekt	indirekt
Prozessorientierte Kostenschätzung	nein	nein	nein	nein	ja
Nachvollziehbarkeit	hoch	mittel	mittel	hoch	mittel
Schätzbasis	Formel	Formel	Diagramm	Datenbank	Formel
Ebenenzugehörigkeit	Komp.	Komp.	Funk.	Komp.	Proz.

Bild 5-28: Gegenüberstellung der fünf Basismethoden

Den fünf Basismethoden liegen jeweils unterschiedlich ausgeprägte Schätzbasen zugrunde. So beruhen die Kurzkalkulation über eine leistungsbestimmende Größe, die ergebnisorientierte sowie die aktivitätsorientierte Kurzkalkulation mittels Regression auf einem formelmäßigen Ansatz. Beim Function Costing gewinnt man das Schätzergebnis aus Diagrammen und bei der Such- bzw. Ähnlichkeitskalkulation ist das Durchsuchen umfangreicher Datenbanken von Nöten.

Die Zahl der bei der Kurzkalkulation zu berücksichtigenden Einflussgrößen ist bei zwei der fünf Basismethoden nahezu unbegrenzt. Hier ist allein der Rechenaufwand bei der Regression limitierend. Die Berücksichtigung nur einer Einflussgröße reduziert sowohl den Aufwand der Vorbereitung als auch der individuellen Schätzung. Am aufwändigsten in der Vorbereitung ist

das Function Costing, da neben mehreren Einflussgrößen auch unterschiedliche Wirkprinzipien berücksichtigt werden.

Allen fünf Basismethoden ist gemeinsam, dass das Ergebnis ihres Einsatzes nur so gut sein kann wie das im Vorfeld bereitgestellte Datenmaterial. So setzen alle Methoden eine aufwändige Sammlung und Aufbereitung historischer Daten im Rahmen der Vorbereitung voraus.

Die aufwändigste individuelle Schätzung resultiert aus der Anwendung der aktivitätsorientierten Kurzkalkulation mittels Regression. Grund dafür ist, dass bei dieser Methode die einzelnen zur Produkterstellung notwendigen Prozessschritte ausgewiesen und geschätzt werden müssen.

Den meisten programmier- und datentechnischen Aufwand birgt die Such- bzw. Ähnlichkeitskalkulation. Hierfür gilt es umfangreiche Datenbanken mit unterschiedlichen Lösungskonzepten verschiedenster Komponenten handzuhaben. Für jedes Lösungskonzept muss die Ausprägung der bei der Vorbereitung bestimmten, kostentreibenden Merkmale zusammen mit den Kosten dokumentiert sein. Die Datenbanken müssen mittels effizienter Suchalgorithmen durchsuchbar sein um dem Entwickler binnen kürzester Zeit zu seiner aktuellen Lösung vergleichbare Konzepte samt der Ausprägung der kostentreibenden Merkmale und den Kosten zu präsentieren.

Diesem hohen Aufwand gegenüber steht eine hohe Aussagequalität und Nachvollziehbarkeit. Eine ähnlich hohe Aussagequalität bietet die aktivitätsorientierte Kurzkalkulation mittels Regression. Eine vergleichbare Nachvollziehbarkeit findet sich aufgrund ihrer Einfachheit bei der Kurzkalkulation mit einer Einflussgröße.

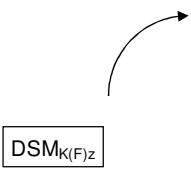
Eine prozessorientierte Schätzung, wie sie der Elektrotechnik entgegenkommt, realisiert die aktivitätsorientierte Kurzkalkulation. Sie unterstützt somit die Kostenschätzung auf Prozessebene. Die funktionsorientierte Kurzkalkulation mittels Function Costing kommt auf der Funktionsebene zum Einsatz und die anderen drei Verfahren stehen auf der Komponentenebene zur Verfügung.

Als einziges Verfahren gibt das Function Costing direkte Hinweise zur Konzeptoptimierung, da es unterschiedliche Wirkprinzipien im Vergleich darstellt. Bei allen anderen Verfahren müssen ohne Hilfestellungen Möglichkeiten der Veränderung der Ausprägung der kostentreibenden Merkmale gefunden werden. Weitere Ansätze der Kostenoptimierung werden im sich anschließenden Kapitel 5.5 behandelt.

5.5 Ableitung von Optimierungsschwerpunkten und -ansätzen

Beim klassischen Zielkostenmanagement erfolgt ein regelmäßiger Vergleich der Schätzkosten mit den Zielkosten. Dieser Abgleich passiert zumeist auf Komponentenebene, so dass Aussagen darüber getroffen werden können, welche Komponenten die Zielkosten überschreiten und somit weiter überarbeitet werden müssen. Es kann jedoch aus diesem Vergleich kein Hinweis darauf abgeleitet werden, wie eine Kostenoptimierung der entsprechenden Komponente bzw. des gesamten Systems erreicht werden kann.

Wie in den vorangehenden Kapiteln bereits mehrfach angedeutet, bietet der Einsatz des Multiple-Domain Ansatzes zur Informationshandhabung im Rahmen des Zielkostenmanagements mechatronischer Produkte entscheidende Vorteile in Hinblick auf die kostenorientierte Konzeptoptimierung. So lassen sich aus der gezielten Analyse der funktionalen und der prozesualen Komponentenstruktur ($DSM_{K(F)z}$ und $DSM_{K(P)s}$) Informationen ableiten, die Hinweise auf Überarbeitungsschwerpunkte und Anregungen für Konzeptänderungen bieten.



Komponenten	Komponenten													Zielkosten [EUR]
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Leiterplatte	Gehäuse	
Quelle	3,1	0	3,1	0	0	0	0	0	0	0	0	3,1	3,1	13
Empfänger	0	3,1	3,1	0	0	0	0	0	0	0	0	3,1	3,1	13
Kontrolleinheit	3,1	3,1	8,8	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	8,8	6,3	35
Spiegel	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
Lager r	0	0	0	0	1,6	1,6	1,6	1,6	0	0	0	1,6	0	8
Zapfen r	0	0	0	0	1,6	1,6	1,6	1,6	0	0	0	1,6	0	8
Lager l	0	0	0	0	1,6	1,6	1,6	1,6	0	0	0	1,6	0	8
Zapfen l	0	0	0	0	1,6	1,6	1,6	1,6	0	0	0	1,6	0	8
Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10
Magnet v	0	0	2,5	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	2,5	0	10
Magnet h	0	0	2,5	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	2,5	0	10
Leiterplatte	3,1	3,1	8,8	0	1,6	1,6	1,6	1,6	0	2,5	2,5	10	6,3	43
Gehäuse	3,1	3,1	6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	6,3	6,3	25
														210

Bild 5-29: Funktionale Komponentenstruktur mit integrierten Zielkosten

Bild 5-29 zeigt die funktionale Komponentenstruktur $DSM_{K(F)z}$ der dynamischen Lidarnachführung mit integrierten Zielkosten. Diese Struktur wurde, wie in Kapitel 5.3 gezeigt, aus den Funktionszielkosten $diag \bar{f}_z$ und der Anbindung von Komponenten an Funktionen DMM_{F-Kg} berechnet.

In der dargestellten Matrix sind zum einen die Zielkosten der einzelnen Komponenten, die sich aus der Aufsummierung der Zeilenwerte ergeben, zu erkennen. Durch Addition aller Komponentenzielkosten erhält man die Gesamtzielkosten. Durch die in der Matrix enthaltene Strukturinformation erhält der Entwickler außerdem Hinweise darauf, ob er sich bei seiner Arbeit primär auf die Komponente an sich oder ihre Schnittstellen mit anderen Systemkomponenten konzentrieren soll [BRAUN ET AL. 2008]. So entfallen bei *Spiegel* und *Stator* keinerlei Kosten auf Schnittstellen zu anderen Komponenten. Dies rührt daher, dass sie die ihnen zugeordneten Funktionen *Lidarstrahl umlenken* und *Antriebskraft übertragen* ohne Beteiligung weiterer Komponenten erfüllen. Anders sieht dies beispielsweise bei der *Kontrolleinheit* aus. Hier finden sich hohe Kosten auch außerhalb der Diagonalen, also bei Schnittstellen zu anderen Komponenten. Hervorzuheben ist die Schnittstelle zur *Leiterplatte*, die besonders hoch bewertet ist. Aus funktionaler Sicht ist das Zusammenwirken dieser beiden Komponenten auch von besonderer Bedeutung, da sie gemeinsam an der Erbringung der drei Funktionen beteiligt sind auf die zusammen 67 % der Zielkosten entfallen.

Die Analyse der funktionalen Komponentenstruktur führt noch zu einem weiteren Ergebnis: Vergleicht man die Komponentenzielkosten mit den Komponentenschätzkosten aus Bild 5-30, so erkennt man, dass insbesondere die *Lager* und *Zapfen* über das Kostenziel hinaus schießen. Aus der funktionalen Komponentenstruktur ist ersichtlich, dass diese vier Komponenten an der Erfüllung (mindestens) einer gemeinsamen Funktion beteiligt sind. Mit diesem Wissen ist es denkbar, eine Kostenreduzierung nicht über die Optimierung der einzelnen Teile zu erzielen, sondern eine Änderung des dahinter stehenden Funktionsprinzips in Betracht zu ziehen und die entsprechenden Komponenten komplett zu ersetzen.

DSM _{K(P)s}		Komponenten													Schätzkosten [EUR]
		Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Leiterplatte	Gehäuse	
Quelle	4,6	4,6	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,9	0,3	15
Empfänger	4,6	4,6	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,9	0,3	15
Kontrolleinheit	0,9	0,9	27	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	2,1	0,3	35
Spiegel	0,3	0,3	0,3	11	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15
Lager r	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15
Zapfen r	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15
Lager l	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15
Zapfen l	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15
Stator	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,4	1,4	1,4	0,3	0,3	0,3	7
Magnet v	0,9	0,9	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,4	2	2	0,9	0,3	0,3	11
Magnet h	0,9	0,9	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,4	2	2	0,9	0,3	0,3	11
Leiterplatte	0,9	0,9	2,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	36	0,3	0,3	43
Gehäuse	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	24	0,3	28
															238

Bild 5-30: Prozessuale Komponentenstruktur mit integrierten Schätzkosten

Ähnliche Anregungen kann man aus der Analyse der prozessualen Komponentenstruktur aus Bild 5-30 ziehen. So lässt sich aus der Matrix ablesen, welche Komponenten über (mindestens) einen Prozessschritt miteinander verknüpft sind, d. h. gemeinsam in (mindestens) einem Prozessschritt behandelt werden. Übersteigt eine Vielzahl der auf diese Weise vernetzten Komponenten die Zielkosten, so sollte der entsprechende Prozessschritt überarbeitet werden und beispielsweise das Fertigungsverfahren angepasst werden. Ein Beispiel hierfür bieten wiederum die *Lager* und *Zapfen* der dynamischen Lidarnachführung.

Diese Hinweise können natürlich nur richtungsweisend sein. Sie geben keinen Hinweis darauf, durch welche konkreten Maßnahmen eine Kostenreduzierung erreicht werden kann. Konkretere Optimierungsanstöße bietet der Einsatz von kostenwirksamen Strukturmerkmalen bei der Untersuchung der funktionalen und der physikalischen Komponentenstruktur. Deren Beschreibung erfolgt nun losgelöst von dem bis hierher zu Erklärungszwecken eingesetzten Beispiel der Lidarnachführung, da zu diesem keine realen Kostenwerte vorliegen, die zur Ermittlung der kostenwirksamen Strukturmerkmale hätten heran gezogen werden können.

In Kapitel 3.2.2 wurden Strukturmerkmale zur Analyse komplexer Systeme vorgestellt und ihre Eignung zur vergleichenden Beschreibung von Produktkonzepten dargelegt. Kern der Betrachtung waren die von MAURER zusammengestellten Algorithmen und Strukturmerkmale der Graphentheorie [MAURER 2007, S.197ff] (Bild 3-16). Mit dem Ziel die Kostenbetrachtung mechatronischer Produkte los zu lösen von der bloßen Betrachtung von Gestaltmerkmalen, wie sie im klassischen Maschinenbau bisher verankert war, wurden diese auf ihre Kostenwirkung hin untersucht. Als Ergebnis dieser Betrachtungen können erste Zusammenhänge zwischen der Produktstrukturausprägung – auch hinsichtlich der Partitionierung mechatronischer Produkte – und den resultierenden Kosten formuliert werden.

Untersucht wurden neun Baugruppen bzw. Produkte aus vier Unternehmen unterschiedlicher Branchen³⁵. Zu diesen neun Systemen wurden die physikalische sowie die funktionale Komponentenstruktur in ungerichteter Form erfasst bzw. aus den erfassten Daten berechnet. Durch die Beschränkung auf ungerichtete Strukturen reduziert sich die Zahl der anwendbaren Strukturmerkmale aus Bild 3-16 auf 16³⁶. Tatsächlich wurden 17 Charakteristika untersucht, da ein disziplinübergreifender Vernetzungsgrad in Ergänzung zum klassischen Vernetzungsgrad erfasst wurde, um den interdisziplinären Charakter mechatronischer Produkte zu berücksichtigen (vgl. Bild 5-33).

Den Strukturmerkmalen wurden die zu den einzelnen Systemen verfügbaren Kosteninformationen sowie weitere Produktinformationen, die die Systeme in Ergänzung zu ihrer bloßen Struktur näher beschreiben, gegenübergestellt.

So lagen zu den einzelnen Systemen die Gesamtkosten und deren Aufspaltung in Komponentenkosten vor. Diese konnten weitergehend unterteilt werden in Materialkosten und Fertigungskosten. In sechs Fällen konnte diese noch weiter in Einzel- und Gemeinkosten aufgespalten werden und in vier Fällen lagen sogar detaillierte Kosten der einzelnen Fertigungsschritte vor, was insbesondere Kosten für Integration und Test erkennbar werden lässt.

³⁵ Eine übersichtliche Aufbereitung der Untersuchungsbasis findet sich im Anhang 9.5 dieser Arbeit. Weiterführende Details zu den untersuchten Systemen können aus Geheimhaltungsgründen nicht offenbart werden.

³⁶ Die hier vorgestellten Ergebnisse sind jedoch so vielversprechend, dass in Kapitel 7.3 die Möglichkeit der Ausweitung der Untersuchungen auf gerichtete Strukturen behandelt wird, was dann auch die Untersuchung der restlichen 15 Strukturmerkmale ermöglicht.

Zu den weiteren erfassten und verwerteten Produktinformationen gehört die Klassifikation der Komponenten in Komponentenklassen sowie die Kennzeichnung unterschiedlicher Flussarten zwischen den Komponenten. Außerdem wurden reine Zukaufskomponenten gekennzeichnet. Zu jeder Komponente wurde außerdem erfasst, zu wie vielen Teilfunktionen sie zugehörig ist. Ergänzend wurden die Kosten aller Teilfunktionen erfasst und kenntlich gemacht, wie viele Komponenten zur Erbringung der jeweiligen Funktion benötigt werden.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass mit der Untersuchung von neun Teilsystemen die im Folgenden dargelegten Ergebnisse nicht statistisch belastbar sind. Dies wäre nur durch eine Ausweitung auf eine deutlich größere Zahl von Untersuchungssystemen zu erreichen. Das Anliegen der vorliegenden Arbeit ist es jedoch aufzuzeigen, dass die Identifikation kostenwirksamer Strukturmerkmale auf dem beschriebenen Weg realisierbar und zielführend ist. Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen somit Tendenzen auf die in heuristische Handlungsanstöße übersetzt werden können.

Bild 5-31 zeigt die Ergebnisse der Analyse der Strukturmerkmale zur Beschreibung von Knoten und Kanten. Grob lässt sich sagen, dass die nach den genannten Charakteristika klassifizierten Komponenten in zwei Klassen geteilt werden können. Auf der einen Seite sind die vergleichsweise günstigen *Isolierten Knoten* (bzw. Komponenten kleiner isolierter Strukturen) und *Blattknoten*; auf der anderen Seite die tendenziell kostenintensiven *Gelenkknoten* und *Busse*. Ebenfalls eher kostenintensiv sind Knoten mit einer hohen *globalen Nähe*. Dabei ist jedoch das angrenzende Teilsystem zu berücksichtigen innerhalb dessen das Charakteristikum *Umgebung* aus Bild 5-32 zum tragen kommt. Auch *Busse* und *Blattknoten* bekommen in Kombination mit weiteren Charakteristika spezielle Bedeutungen. Wichtig dabei ist die parallele und vergleichende Betrachtung von Komponenten innerhalb der physikalischen und der funktionalen Komponentenstruktur. Besonders differenzierte Aussagen ergeben sich, wenn Gesetzmäßigkeiten mit Gültigkeit für spezielle Komponentenklassen identifiziert wurden. Hier gilt es insbesondere die erwähnten Ausnahmen zu berücksichtigen. Besonders zu behandeln sind Komponenten spezieller Disziplinen, wie optische Komponenten, aufwändige Magnete und so weiter. Diese sind generell sehr hochpreisig und folgen damit nicht den gefundenen Gesetzmäßigkeiten. Außerdem lassen sich spezielle Gesetzmäßigkeiten für Zukaufteile und spezielle Kostenarten, wie zum Beispiel direkte Fertigungskosten, erkennen.

Für das kostengünstige Konstruieren bzw. die Optimierung in der Folge einer Zielkostenüberschreitung ergeben sich aus den aufgeführten Gesetzmäßigkeiten wertvolle Hinweise auf besonders zu fokussierende Komponenten. Diese können dann mit Hilfe disziplinspezifischer Design to Cost Richtlinien (s. Kapitel 3.3.4) überarbeitet werden. So sollte beispielsweise bei mechanischen Komponenten mit vielen Schnittstellen auf eine besonders fertigungsgerechte Konstruktion geachtet werden um auf diese Weise die potentiell hohen, direkten Fertigungskosten zu reduzieren. Genauso lässt sich auch erkennen für welche Komponenten aufgrund ihrer voraussichtlich geringen Kosten der Entwicklungsaufwand eher gering gehalten werden sollte.

Aus Bild 5-31 ist auch erkennbar, dass nicht für alle Strukturmerkmale ausreichend Beispiele in den vorliegenden Daten gefunden werden konnten. Teilweise konnten auch keine Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden.

	funktionale Komponentenstruktur	physikalische Komponentenstruktur
Knoten/Kanten		
Gelenkknoten	Gelenkknoten verkörpern kostenintensive Komponenten (5/5)	<i>in analysierten Daten nicht ausreichend vorhanden</i>
Brückenkante	<i>in analysierten Daten nicht vorhanden</i>	<i>in analysierten Daten nicht vorhanden</i>
Bus	Stark vernetzte Komponenten verursachen überdurchschnittlich hohe Kosten (8/8) Stark bis mäßig stark vernetzte Komponenten, die gleichzeitig vielen Funktionen zugehörig sind, verursachen ebenfalls hohe Kosten (7/9) Zukaufteile sind tendenziell stark funktional vernetzt (5/5)	Bei besonders stark vernetzten Komponenten handelt es sich um starre, mechanische Komponenten (7/9) und leistungselektronische Komponenten (2/9) Stark vernetzte Komponenten verursachen überdurchschnittlich hohe Kosten (6/9) Antriebe bilden eine Ausnahme, da sie aufgrund ihrer Gegebenheiten oftmals nur über eine primäre Schnittstelle verfügen, dabei jedoch kostenintensiv sind (1/1) Eine weitere Ausnahme bilden Komponenten, die zugleich <i>isolierte Knoten</i> bzw. Teil eines kleinen, <i>isolierten Clusters</i> in der funktionalen Komponentenstruktur sind (4/4). Dies liegt oft darin begründet, dass diese Komponenten Stützstrukturen ohne primäre Funktionen repräsentieren. Mechanische Komponenten mit vielen Schnittstellen haben auffällig hohe direkte Fertigungskosten (5/6)
Nähe/Distanz (global)	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	Tendenziell deutet eine größere Nähe auf höhere Kosten hin und umgekehrt (7/9). Dabei ist jedoch die Gesetzmäßigkeit der <i>Umgebung</i> zu berücksichtigen (s. Bild 5-32).
Isolierter Knoten/ Komponenten isolierter Strukturen	Bei isolierten Knoten handelt es sich zumeist um starre, mechanische Komponenten (20/23) Die Kosten eines isolierten Knotens betragen weniger als 11% der Kosten der kostenintensivsten Systemkomponente (8/8 bzw. 16/23)	<i>in analysierten Daten nicht vorhanden</i>
Blattknoten	Blattknoten sind keine kostentreibenden Komponenten. Sie tragen nur zu einer Funktion bei, die wiederum nur durch eine weitere Komponente realisiert wird (4/5)	Blattknoten sind keine kostentreibenden Komponenten (20/30). Sie verkörpern in der Regel Schnittstellen zu anderen Baugruppen, Nutzerschnittstellen oder Verkleidungsteile. Blattknoten sind insbesondere günstig, wenn sie zugleich <i>isolierte Knoten</i> der funktionalen Systemstruktur sind (7/9) Ausnahmen bilden hochwertige Verkleidungsteile im Sichtbereich von Premiumprodukten sowie aufwändige Bedieneinheiten.

(x/y) In x von y Fällen lässt sich der entsprechende Zusammenhang nachweisen.

Bild 5-31: Kostenwirkung von Strukturmerkmalen zur Beschreibung von Knoten und Kanten

Ebenso wie für einzelne Komponenten lassen sich Gesetzmäßigkeiten für Teilsysteme dokumentieren. Eine entsprechende Zusammenstellung findet sich in Bild 5-32. Zentraler Punkt sind hier die *vollständig vernetzten Cluster* der funktionalen als auch der physikalischen Komponentenstruktur. Für beide gilt, dass Komponenten, die Mitglieder vieler unterschiedli-

cher Cluster sind, überdurchschnittlich hohe Kosten verursachen. Dabei ist zu beachten, dass wenn eine Komponente zu vielen Clustern der funktionalen Komponentenstruktur gehört, dies nicht zwangsläufig für ihre Stellung in der physikalischen Komponentenstruktur gilt – und umgekehrt. Eine Besonderheit lässt sich für Komponenten formulieren, die Mitglieder gleich vieler Cluster in der funktionalen Komponentenstruktur sind. Denn bei diesen greift wiederum die zuvor erwähnte Gesetzmäßigkeit der *Umgebung*, die im Grunde besagt, dass in der physikalischen Komponentenstruktur nur selten zwei kostenintensive Komponenten aneinander grenzen. So ist zumeist von zwei Komponenten, die in der funktionalen Komponentenstruktur gleich vielen Clustern angehören, aber in der physikalischen Komponentenstruktur direkt aneinandergrenzen nur eine wirklich kostenintensiv. Auch in Hinblick auf die Ähnlichkeit zweier Komponenten bzw. Teilstrukturen in der physikalischen Komponentenstruktur lassen sich Anhaltspunkte finden. Diese legen nahe, dass nach Definition ähnliche Komponenten, also Komponenten die sich bezüglich ihrer Anbindung an die restlichen Komponenten des Systems ähneln, auch ähnliche Kosten verursachen. Allerdings konnten hierfür in den vorliegenden Daten nur zwei Beispiele ausreichend ähnlicher Komponenten bzw. Teilstrukturen gefunden werden.

Für das kostengünstige Konstruieren lassen sich wieder direkte Überarbeitungsschwerpunkte ableiten. So lohnt sich aus Kostensicht die Konzentration auf Mitglieder zahlreicher Cluster beider Ausprägungen der Komponentenstruktur.

	funktionale Komponentenstruktur	physikalische Komponentenstruktur
Teilsysteme		
Doppeltverbundene Komponente	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>
Cluster	Komponenten, die Mitglieder vieler unterschiedlicher Cluster sind, verursachen überdurchschnittlich hohe Kosten (7/8) Weisen zwei oder mehr Komponenten die höchste Clusterzugehörigkeit auf, so greift die Gesetzmäßigkeit der <i>Umgebung</i> (5/5) Gehört eine Komponente vielen Clustern der physikalischen Komponentenstruktur an, so heißt das nicht, das dies auch für die funktionale Komponentenstruktur gilt (4/7) s.a. Bild 5-33 unter <i>Clustern</i>	Komponenten, die Mitglieder vieler unterschiedlicher Cluster sind, verursachen überdurchschnittlich hohe Kosten (7/8) Gehört eine Komponente vielen Clustern der funktionalen Komponentenstruktur an, so heißt das nicht, das dies auch für die physikalische Komponentenstruktur gilt (3/7) s.a. Bild 5-33 unter <i>Clustern</i>
Hierarchie	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>
Umgebung	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	Die Durchschnittskosten von Komponenten in der Umgebung einer kostenintensiven Komponente betragen weniger als 50% der selbigen (17/18)
Menge indirekter Abhängigkeiten	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>
Ähnlichkeit	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	<i>in analysierten Daten nicht ausreichend vorhanden</i>
Spannbaum	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>

Bild 5-32: Kostenwirkung von Strukturmerkmalen zur Beschreibung von Teilsystemen

Die Konzentration auf Cluster ergibt sich auch aus der Betrachtung ihrer systemübergreifenden Bedeutung (Bild 5-33). So entfallen lediglich 4,62 % der Gesamtkosten auf Komponenten außerhalb von Clustern der funktionalen Komponentenstruktur. In Hinblick auf den Vernetzungsgrad der unterschiedlichen Strukturen ließ sich feststellen, dass die funktionale Komponentenstruktur generell stärker vernetzt ist als die physikalische. Eine starke Vernetzung der physikalischen Komponentenstruktur resultiert nachweislich in hohen Kosten für die Systemmontage und den Systemtest. Ist eine Baugruppe physikalisch stark vernetzt und treten dabei viele unterschiedliche Flussarten auf, so erhöht dies deutlich die Absicherungskosten innerhalb der Teilsysteme.

Zur Berücksichtigung des interdisziplinären Charakters mechatronischer Produkte wurde der disziplinübergreifende Vernetzungsgrad als ergänzendes Strukturmerkmal eingeführt. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der disziplinübergreifenden Kanten und den insgesamt im System vorhandenen Kanten. Er steigt mit der Anzahl der Disziplinen und hat ebenfalls Einfluss auf die Testkosten.

Für das kostengünstige Konstruieren lässt sich daraus, und auch aus den bereits zuvor beschriebenen Gesetzmäßigkeiten, ableiten, dass es aus Kostensicht durchaus Sinn machen kann, den Vernetzungsgrad einer Struktur zu reduzieren. Besonders deutlich zeigt sich dies bei der durchgeführten Betrachtung zweier funktionsgleicher Produkte bei der lediglich einzelne Funktionsprinzipien ausgewechselt wurden. Die stärker vernetzte Variante ist dabei deutlich teurer. Insbesondere ist darauf zu achten Flussarten zwischen den Komponenten zu vereinheitlichen. Dies ist eine Tendenz, die sich – ohne das konkrete Bewusstsein ihrer Kostewirkung – generell in der Weiterentwicklung technischer Produkte beobachten lässt [STETTER & NIEDERMEIER 2007].

	funktionale Komponentenstruktur	physikalische Komponentenstruktur
Systeme		
Clustern	Auf die Summe der Clustermitglieder entfallen im Schnitt 95,38% der Gesamtkosten. Die restlichen 4,62% entfallen auf Komponenten, die der Erfüllung von Hilfs- und Verknüpfungsfunktionen (Abstützungen, Abdeckungen, Bedienkomponenten, Fixierungen etc.) dienen (9/9)	Auf die Summe der Clustermitglieder entfallen im Schnitt 57,85% der Gesamtkosten (8/8)
Vernetzungsgrad	Der Vernetzungsgrad der funktionalen Komponentenstruktur ist generell höher als der der physikalischen Komponentenstruktur (9/9)	Stark vernetzte Baugruppen, die viele unterschiedliche Flussarten vereinen verursachen tendenziell höhere Prüfkosten (4/4) Ein hoher Vernetzungsgrad führt tendenziell zu hohen (übergreifenden) Integrationskosten (montieren, prüfen) der Baugruppe (4/4)
Disziplinübergreifender Vernetzungsgrad	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	Umso höher der disziplinübergreifende Vernetzungsgrad ist, desto höher sind die Prüfkosten (4/4) Der disziplinübergreifende Vernetzungsgrad steigt mit der Anzahl der beteiligten Disziplinen (6/9)
Matrix indirekter Abhängigkeiten	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>	<i>keine Gesetzmäßigkeit identifiziert</i>

Bild 5-33: Kostenwirkung von Strukturmerkmalen zur Beschreibung von Systemen

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass nicht die klassischen Komplexitätsmerkmale wie die Anzahl der Komponenten oder ihrer Relationen kostenentscheidend sind, sondern vielmehr ihre Konstellation. Am Rande der durchgeführten Untersuchungen zeigten sich unabhängig von den untersuchten Strukturmerkmalen noch weitere Erkenntnisse. So lässt die Anzahl der erfüllten Teilfunktionen keinen Schluss auf die Höhe der Kosten einer Komponente zu. Eine Ausnahme bilden Leitungen und Verkabelungen sowie Prozessoren. Hier steigen die Kosten mit der erbrachten Funktionalität. In Hinblick auf die betrachteten Teilfunktionen lässt sich sagen, dass Funktionen, deren Erfüllung nach vielen Teilen verlangt, tendenziell teurer sind als andere. Ausnahmen bilden Hilfsfunktionen, die nicht direkt zur Erfüllung der übergeordneten Funktion beitragen.

Die erwähnten Handlungsanstöße für das kostengünstige Konstruieren müssen nicht erst nach der Durchführung einer ersten Kostenschätzung zum Einsatz kommen, sondern können gleich von Beginn an als Grundsätze bzw. Handlungsanweisungen in den disziplinübergreifenden Systementwurf einfließen. Die erfolgte Identifikation allgemeingültiger Kostentreiber mechatronischer Produkte ermöglicht es von Beginn der Entwicklung an auf diese zu achten und spezielle Strukturausprägungen wie beispielsweise das Vorhandensein stark vernetzter Strukturen unterschiedlicher Flussart zu vermeiden.

Die Umsetzung dieser und aller weiteren Erkenntnisse des Kapitels 5 in Form des Zielkostenmanagement-Leitfadens ist dem Anhang 9.1 zu entnehmen. Im sich anschließenden Kapitel wird der Leitfaden nun auf ein Praxisbeispiel angewendet und abschließend bewertet.

6 Evaluierung des transdisziplinären Zielkostenmanagements

Nachdem im vorangehenden Kapitel der entwickelte Leitfaden mit seinen integrierten Hilfsmitteln vorgestellt wurde, erfolgt in diesem Kapitel die exemplarische Anwendung auf eine der Praxis entstammende Erweiterungskonstruktion an einer Gaskochmulde. Auf diese Weise werden die Durchgängigkeit und weitere sich ergebende Vorteile des Ansatzes verdeutlicht. Außerdem wird deutlich, dass es sich bei den Schritten des Leitfadens nicht um eine stringente Abfolge handelt, sondern dass die einzelnen Schritte flexibel zum Einsatz kommen können.

6.1 Beispielhafte Anwendung des Leitfadens

Mittlerweile weisen sogar Gaskochmulden zahlreiche elektro- und informationstechnische Komponenten auf, so dass sie als mechatronische Produkte bezeichnet werden können und als Evaluierungsbeispiel für den entwickelten Ansatz dienen können. Im in der Folge beschriebenen Fall geht es um eine Funktionserweiterung einer Gaskochmulde mit automatischer Flammüberwachung. Die Gaskochmulde soll um eine Temperaturregelung erweitert werden. Das heißt, die Gaszufuhr soll in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen wie z. B. Temperaturschwankungen und Zugluft geregelt werden.

6.1.1 Beschreibung des Ausgangsproduktes

Bild 6-1 beschreibt zunächst das Funktionsprinzip des Ausgangsproduktes mittels eines umsatzorientierten Funktionsmodells [LINDEMANN 2009, S.119F]. Dreht der Benutzer am Bedienknebel, so wird die Drehung über ein Kardangestänge auf den entsprechenden Gashahn übertragen und auf diese Weise die Gaszufuhr zum Brenner geregelt. Außerdem wird durch das Drehen des Kardangestänges ein Schalter betätigt, durch den zum einen das Hauptventil geöffnet und zum anderen der Zündvorgang gestartet wird. Nach zehn erfolglosen Zündversuchen wird das Hauptventil wieder geschlossen. Dasselbe passiert, sollte die Flamme während des Betriebs erlöschen. Detektiert wird dies durch die Unterbrechung eines Stromkreises am Brenner, welcher bei bestehender Flamme geschlossen ist. Das System versucht daraufhin zehnmal den Brenner erneut zu entzünden. Zur Information des Nutzers über den Systemzustand sind die Bedienknebel mit LEDs ausgestattet.

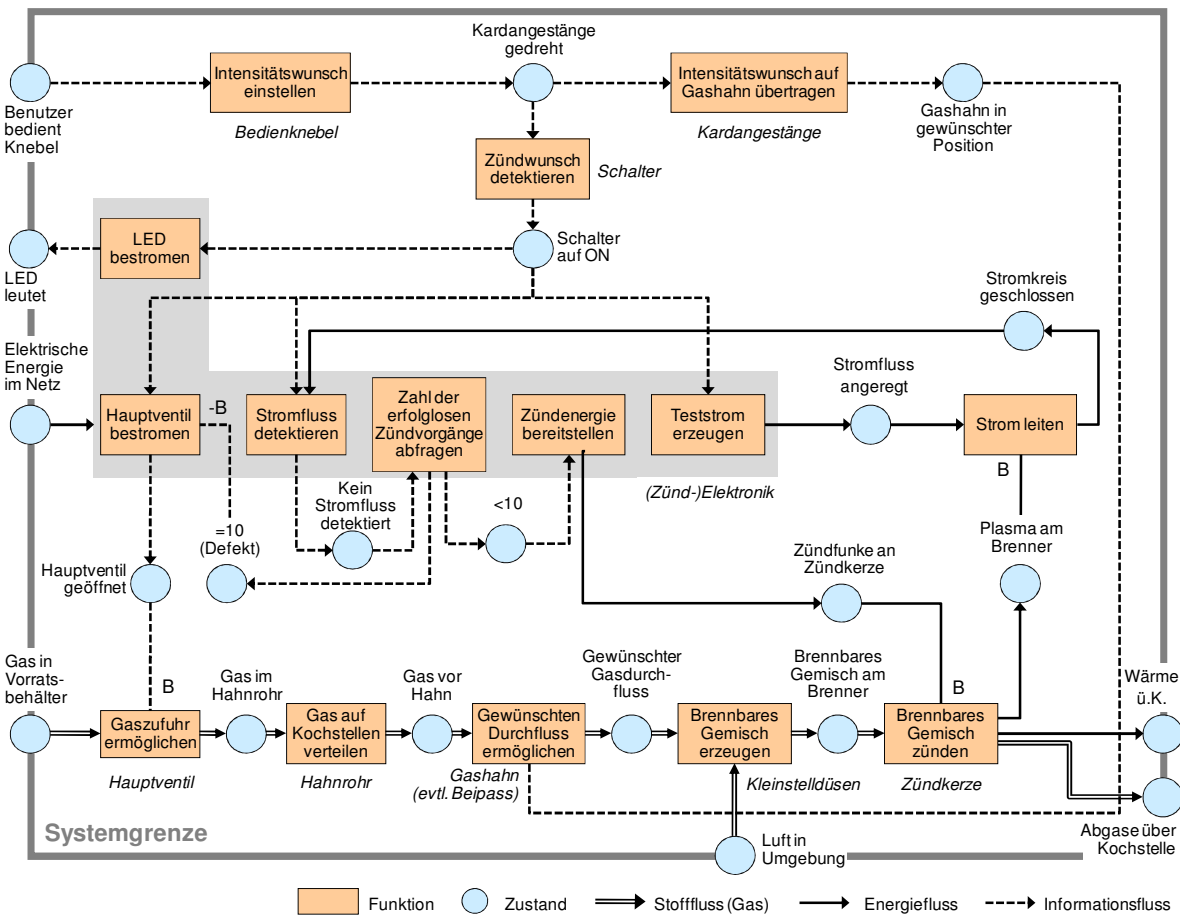


Bild 6-1: Detailliertes, umsatzorientiertes Funktionsmodell des Ausgangsproduktes

Bild 6-2 zeigt die physikalische Komponentenstruktur des Ausgangsproduktes. Für die Betrachtung wurden nur die zentralen Funktionsteile berücksichtigt. Verkleidungs- und Montage-teile sowie Aufsätze wurden bewusst außen vor gelassen. Die Herstellkosten der dargestellten Komponenten inklusive Montage, Integration und Verpackung betragen 170 EUR³⁷. Die vier kostenintensivsten Komponenten sind

- die **Zündelektronik**,
- das **Hauptventil**,
- die **Bedienknebel** und
- der **Brenner**.

Sie verursachen zusammen über 56 % der Gesamtkosten.

³⁷ Die im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels aufgeführten Kosten entsprechen aus Geheimhaltungsgründen nicht den realen Kosten des Beispielproduktes. Die Relation einzelner Komponentenkosten wurde jedoch erhalten.

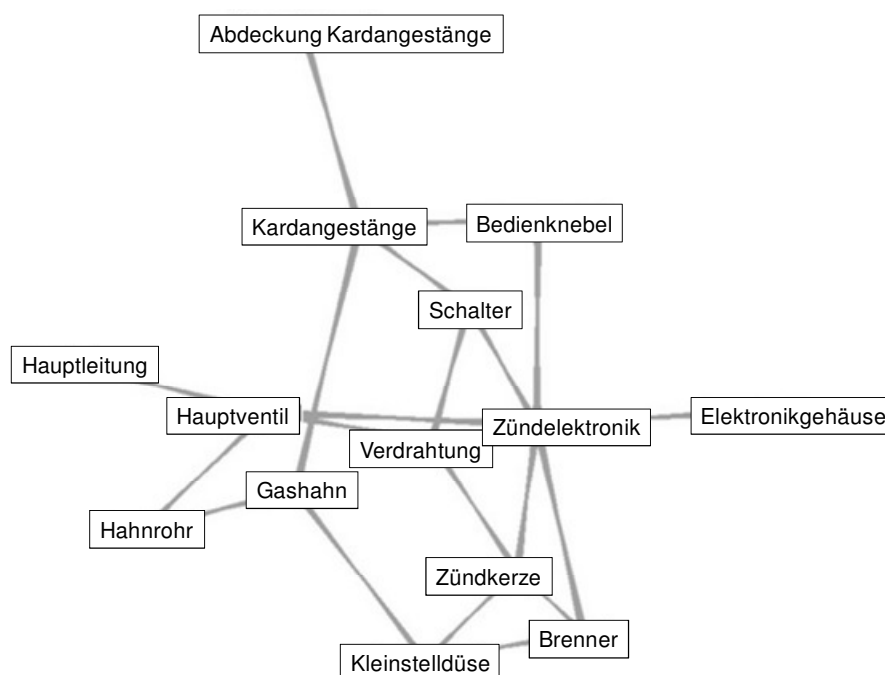


Bild 6-2: Physikalische Komponentenstruktur des Ausgangsproduktes

6.1.2 Anforderungen und resultierende Überarbeitungen

Ausgehend von dieser Struktur bestand die Aufgabe eines interdisziplinären Entwicklerteams darin, die Gaskochmulde um eine Temperaturregelung zu erweitern. Die Zielkosten für die Realisierung der zusätzlichen Funktion *Brennertemperatur regeln* wurden mit 60 EUR veranschlagt. Diese Zielkosten entfallen zum einen auf neu zu integrierende Komponenten. Zum anderen können sie als Mehrkosten zu ändernder Komponenten des Ausgangsproduktes verstanden werden.

Um eine automatische Temperaturregelung zu ermöglichen muss die manuelle und rein mechanische Einstellung der Gashähne über das Kardangestänge ersetzt werden. Die Entwickler ziehen dafür Gashähne in Betracht, die als regelbar angetriebenes Ventil bezeichnet werden können. Eine solche Einheit aus Gashähnen, Hahntrieben und einem zentralen Magnetventil kann über einen Zulieferer bezogen werden.

Mit dem Einsatz eines solchen regelbaren Ventils ändert sich das gesamte Funktionsprinzip des Systems (vgl. Schritt 1 des Leitfadens aus Kapitel 9.1). Dies beginnt bei den Bedienknöpfen, deren mechanisches Signal nun in ein informationstechnisches Signal übersetzt werden muss. Es muss dabei sowohl den Intensitätswunsch als auch den Zündwunsch beinhalten. Durch die Verarbeitung des Signals in einer Informationseinheit (vergleichbar der früheren Zündelektronik) kann das Hauptventil geöffnet und der Durchfluss am Ventil geregelt werden. Wie bereits beschrieben verfügt die Ventileinheit über einen Hahntrieb. Um diesen

betreiben zu können bedarf es eines speziellen Treibers. Um eine Nachregelung der Temperatur zu ermöglichen ist außerdem ein Sensor in Form eines Thermoelements am Brenner von Nöten. Dieser kann ebenfalls dazu eingesetzt werden das unbeabsichtigte Erlöschen der Flamme zu detektieren. Dies soll auch bei dem neuen Modell zu zehn automatischen Zündversuchen führen. Das beschriebene Funktionsprinzip kann mit Hilfe eines umsatzorientierten Funktionsmodells nach dem Vorbild von Bild 6-1 dokumentiert werden³⁸.

Die beschriebenen Änderungen des Funktionsprinzips führen zur Eliminierung und Veränderung bestehender Komponenten. Andere Komponenten bleiben unverändert erhalten und wieder andere müssen neu integriert werden. Es erfolgt also eine Anpassung der gesamten Komponentenstruktur (vgl. Schritte 2a und 2b des Leitfadens).

Bild 6-3 zeigt die durch das Entwicklerteam vorgesehenen Änderungen an den Komponenten der Gaskochmulde: Das Kardangestänge und seine Abdeckung werden eliminiert. Sieben Komponenten können unverändert übernommen werden. Die Bedienknebel müssen geringfügigen Änderungen unterzogen werden. Umfangreichere Änderungen ergeben sich an der Zündelektronik, der Verdrahtung und dem Schalter. Letzterer wird durch ein Schaltpult ersetzt, welches das mechanische Signal der Bedienknebel in ein durch die Zündelektronik interpretierbares, informationstechnisches Signal übersetzt. Die Gashähne als solches werden ersetzt durch das regelbar angetriebene Ventil, welches die neuen Komponenten Hahntrieb und Magnetventil integriert (graue Hinterlegung in Bild 6-3). Ebenfalls neu hinzu kommen der Antriebstreiber und ein Thermoelement.

eliminiert	unverändert	verändert		neu	
Kardangestänge	Hauptleitung	Gashähne	10%*	Magnetventil	5%*
Abdeckung Kardangestänge	Hauptventil	Schalter	5%*	Hahntrieb	25%*
	Kleinstelldüsen	Zündelektronik	25%*	Antriebstreiber	5%*
	Hahnrohre	Bedienknebel	5%*	Thermoelement	15%*
	Elektronikgehäuse	Verdrahtung	5%*		
	Brenner				
	Zündkerze				

* Beitrag zur Erbringung der Funktion *Brennertemperatur regeln*

Bild 6-3: Gewählte Veränderungen zur Erbringung der neuen Funktion

Bild 6-3 zeigt außerdem den bewerteten Beitrag der veränderten und neuen Komponenten zur Erbringung der neuen Funktion *Brennertemperatur regeln*. Aus den Zielkosten der Entwicklung, also den Zielkosten der Funktion in Höhe von 60 EUR sowie den durch die Eliminierung des Kardangestänges zusätzlich zur Verfügung stehenden 20 EUR, können somit auf vereinfachte Weise Zielkosten der neuen Komponenten ermittelt werden. Bei den zu verändernden Komponenten werden die so ermittelten Zielkosten auf die Kosten der Ausgangskomponenten aufgeschlagen. Für die unveränderten Komponenten werden die bekannten Kosten der Ausgangslösung als Zielkosten angesetzt.

³⁸ Bei dem verwendeten Beispiel handelt es sich um eine real durchgeführte Produktentwicklung. Aus Gründen der Geheimhaltung kann das Funktionsprinzip des resultierenden Produktes nicht detaillierter dargelegt werden.

Dies stellt einen gegenüber dem Leitfaden (vgl. Schritte 4ab und 5ab) vereinfachten Umgang mit Funktionszielkosten dar, da die dort beschriebenen Matrizen $\overrightarrow{diagf_z}$, DMM_{F-Kg} und $DSM_{K(F)z}$ nicht explizit und auch nicht für das komplette System aufgestellt werden. Dies ist jedoch eine zulässige Vereinfachung, da die nachfolgenden Schritte nicht beeinflusst werden und außerdem der Aufwand der Methodenanwendung deutlich reduziert wird. Ergebnis dieses Schrittes ist eine Aufstellung der Komponentenzielkosten, die wie in Schritt 5ac des Leitfadens gezeigt, in Form einer Diagonalmatrix $\overrightarrow{diagk_z}$ dokumentiert werden kann.

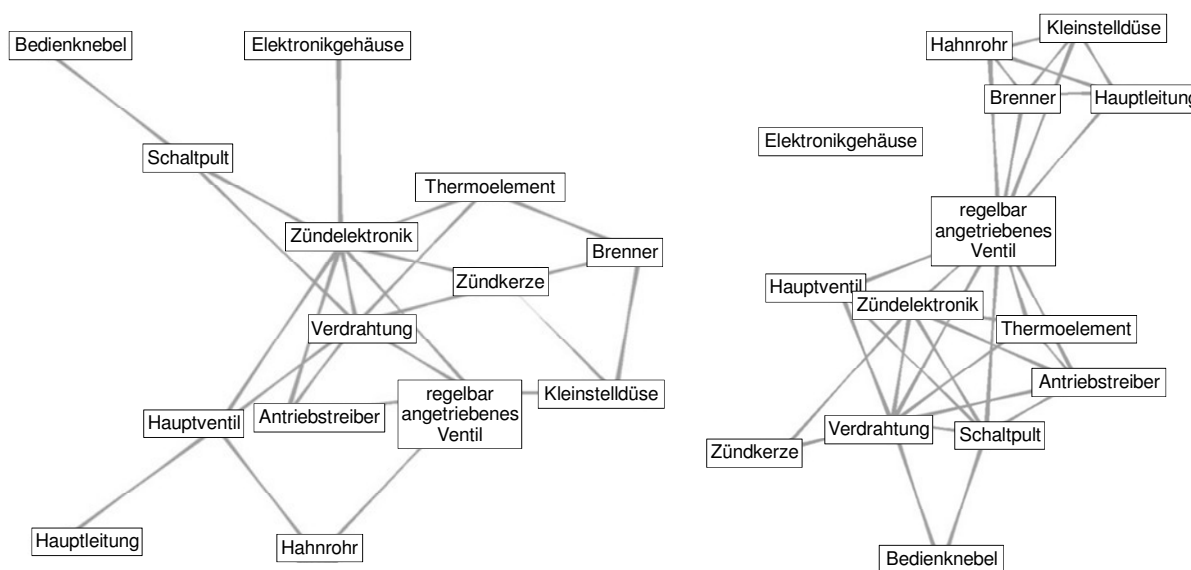



Bild 6-4: Physikalische (links) und funktionale (rechts) Komponentenstruktur des überarbeiteten Produktes

Die sich aus den beschriebenen Änderungen ergebende physikalische Komponentenstruktur ist in Bild 6-4 auf der linken Seite dargestellt. Durch das Hinzufügen einer neuen Funktion und die beschriebenen Änderungen der Komponenten ergibt sich auch eine neue Ausprägung der funktionalen Komponentenstruktur (Bild 6-4, rechts). Diese wurde gemäß Schritt 2b des Leitfadens aus der überarbeiteten DMM_{F-K} berechnet.

Die Dokumentation der Veränderungen von der physikalischen Komponentenstruktur des Ausgangsproduktes $DSM_{K(K)1}$ zur physikalischen Komponentenstruktur des neuen Produktes $DSM_{K(K)2}$ erfolgt im dargelegten Beispiel mittels der Mapping DMM_{MAP_1} und der $\Delta DSM_{K(K)}$ gemäß Schritt 13 (Bild 6-5): So ist aus der abgebildeten MAP_1 abzulesen, dass der *Gashahn* durch das *regelbar angetriebene Ventil* und der *Schalter* durch das *Schaltpult* ersetzt werden. Das *Kardangestänge* und seine *Abdeckung* werden eliminiert (leere Zeilen) und der *Antriebstreiber* und das *Thermoelement* kommen neu hinzu (leere Spalten). Alle weiteren Komponenten werden, da sie entweder unverändert oder verändert übernommen werden, auf sich selber abgebildet. In der $\Delta DSM_{K(K)}$ ist das Eliminieren (-1) bzw. das Hinzukommen (1) von Schnittstellen dokumentiert. So ist erkennbar, dass der Brenner nun keine direkte Schnittstelle zur Zündelekttronik mehr hat, sondern die Temperaturüberwachung mittels eines Thermoelements erfolgt. Dieses muss so gestaltet werden, dass es ohne Veränderung des Brenners integriert werden kann. Der mit Hilfe der MAP_1 und der ΔDSM geschaffene Zusammenhang zwischen der

physikalischen Komponentenstruktur des Ausgangsproduktes und der der Neuentwicklung lässt sich nach Schritt 13 des Leitfadens wie folgt ausdrücken:

$$DSM_{K(K)t2} = MAP_1^T \cdot DSM_{K(K)t1} \cdot MAP_1 + \Delta DSM_{K(K)}$$



		Komponenten ₂																	
		Hauptleitung	Hauptventil	Kleinsteldüse	Hahnrohr	Zündelektronik	Elektronikgehäuse	Brenner	Zündkerze	Bedienknebel	Verdrahtung	regelbar angetriebenes Ventil	Antriebstreiber	Thermoelement	Schaltpult				
		1	3	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	18				
Komponenten ₁	Hauptleitung	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MAP ₁
	Gashahn	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	Hauptventil	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Schalter	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	Kleinsteldüse	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Hahnrohr	6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Zündelektronik	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Elektronikgehäuse	8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Brenner	9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Zündkerze	10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Kardangestänge	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abdeckung Kardangestänge	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Bedienknebel	13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Verdrahtung	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Komponenten ₂	Hauptleitung	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ΔDSM _{k(K)}
	Hauptventil	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Kleinsteldüsen	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Hahnrohre	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Zündelektronik	7	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	1	1	1	0	0	0	
	Elektronikgehäuse	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Brenner	9	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	Zündkerze	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Bedienknebel	13	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	Verdrahtung	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
	regelbar angetriebenes Ventil	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
	Antriebstreiber	16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
	Thermoelement	17	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
	Schaltpult	18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	

Bild 6-5: Modellierung der Konzeptveränderungen mittels MAP₁ und ΔDSM_{k(K)}

6.1.3 Klassifizierung der Komponenten mittels kostenwirksamer Strukturmerkmale

Unabhängig von den ermittelten Komponentenzielkosten kann auf Basis der vorliegenden Strukturinformationen aus Bild 6-4 im Vorfeld der Ausarbeitung der einzelnen Komponenten eine Bewertung ihrer zu erwartenden Kosten erfolgen. Auf diese Weise kann sich die Entwicklung auf besonders kostenintensive Komponenten konzentrieren und eine gezielte Kostenoptimierung bereits im ersten Entwicklungsdurchgang verfolgen. Des Weiteren kann die Genauigkeit der für die Komponenten durchzuführenden Kostenschätzungen festgelegt werden. Potenziell kostenintensive Komponenten sollten mit größerem Aufwand geschätzt werden als günstige Komponenten.

Mit Hilfe der ermittelten, kostenwirksamen Strukturmerkmale (vgl. Schritt 12) lassen sich die folgenden potenziellen Kostentreiber identifizieren:

- **Regelbar angetriebenes Ventil**
Erfülltes Charakteristikum: *Gelenkknoten* der funktionalen Komponentenstruktur
- **Zündelektronik**
Erfüllte Charakteristika: *Bus* der physikalischen und der funktionalen Komponentenstruktur, höchste *Clusterbeteiligung* in der physikalischen Komponentenstruktur
- **Verdrahtung**
Erfüllte Charakteristika: *Bus* der physikalischen und der funktionalen Komponentenstruktur, höchste *Clusterbeteiligung* in der physikalischen und der funktionalen Komponentenstruktur
- **Schaltpult**
Erfülltes Charakteristikum: *Bus* der funktionalen Komponentenstruktur

Alle vier genannten Komponenten werden im Zuge der beschriebenen Produktentwicklung auch tatsächlich grundlegend überarbeitet bzw. sogar neu entwickelt und integriert. Aus diesem Grund sollten sie bei der anschließenden Kostenschätzung und Überarbeitung besonders intensiv betrachtet werden.

Bezieht man sich wieder auf die Strukturmerkmale aus Schritt 12, so sind folgende Komponenten bei der Kostenschätzung und Produktentwicklung aufgrund ihrer zu erwartenden geringen Kosten eher zweitrangig und mit geringerer Gründlichkeit zu behandeln:

- **Elektronikgehäuse**
Erfüllte Charakteristika: *Isolierter Knoten* der funktionalen Komponentenstruktur, *Blattknoten* der physikalischen Komponentenstruktur, keine *Clusterbeteiligung* in der physikalischen als auch in der funktionalen Komponentenstruktur
- **Hauptleitung**
Erfülltes Charakteristikum: *Blattknoten* der physikalischen Komponentenstruktur

Der **Bedienknebel** wäre als *Blattknoten* der physikalischen Komponentenstruktur ebenfalls eine Komponente mit potenziell geringen Kosten. Allerdings wurden in Kapitel 5.5 auch Ausnahmen von dieser Regel formuliert (Bild 5-31). Bei der betrachteten Gaskochmulde handelt es sich um ein Gerät aus dem Premiumsektor mit aufwändigen, hier nicht betrachteten,

Verkleidungsteilen und hochwertigen Bedienelementen. Laut Bild 5-31 sind hochwertige Bedienelemente, die eben aufgrund ihrer Natur als Bedienelement Blattknoten der physikalischen Komponentenstruktur sind, oftmals kostenintensiv. So gehörte der Bedienknebel auch beim Ausgangsprodukt zu den vier kostenintensivsten Komponenten. Da jedoch nur geringe Änderungen an den Bedienknebeln zu erwarten sind, können für eine erste Schätzung die Kosten des Vorgängers genutzt werden.

Die beiden, als potenziell günstig eingestuften Komponenten, Elektronikgehäuse und Hauptleitung bleiben bei der beschriebenen Erweiterungskonstruktion unverändert. Auch hier können zur Aufwandreduzierung der Kostenschätzung die Kosten aus dem Vorgängerprodukt verwendet werden.

Ein weiteres Charakteristikum zur Identifikation günstiger Komponenten ist die *Umgebung* kostenintensiver Komponenten. Betrachtet man die Umgebung der vier potenziell kostenintensivsten Komponenten, so stößt man auf die folgenden:

- **Thermoelement**
- **Zündkerze**
- **Kleinsteldüse**
- **Hahnrohr**
- **Antriebstreiber**
- **Hauptventil**

Auch hier ist bei der Interpretation wieder Vorsicht geboten. So lässt die Umgebung der vier kostenintensivsten Komponenten darauf schließen, dass es sich beim **Hauptventil** um eine kostengünstige Komponente handelt. Allerdings war auch sie, wie zuvor die Bedienknebel, unter den vier kostenintensivsten Komponenten des Ausgangsproduktes. Somit ist zu erwarten, dass es auch einen deutlichen Anteil an den Kosten des Folgeproduktes haben wird.

Die letzte, bisher unberücksichtigte Komponente ist der **Brenner**. Er war ebenfalls unter den vier teuersten Komponenten des Vorgängers und bleibt unverändert. Somit muss er nicht explizit geschätzt werden. Bild 6-6 zeigt abschließend die Klassifikation des Brenners und aller anderen Komponenten in der Übersicht. Es wird sich durch die nachfolgende Kostenschätzung zeigen, ob die getroffenen Einschätzungen bestätigt werden können.

potenziell kostenintensiv	potenziell kostengünstig
Regelbar angetriebenes Ventil	Elektronikgehäuse
Zündelektronik	Hauptleitung
Verdrahtung	Thermoelement
Schaltpult	Zündkerze
Bedienknebel	Kleinsteldüse
Hauptventil	Hahnrohr
Brenner	Antriebstreiber

Bild 6-6: Klassifikation der Komponenten der Gaskochmulde mit Temperaturregelung

6.1.4 Durchführung der Kostenschätzung

Da bei der beschriebenen Produktentwicklung zahlreiche Komponenten des Ausgangsproduktes übernommen werden, bleiben auch die zu ihrer Herstellung notwendigen Prozessschritte und die damit verbundenen Kosten erhalten. Somit kann ein Großteil des Pfadmodells des Ausgangsproduktes als Basis für die Kostenschätzung wiederverwendet werden. Das Pfadmodell dokumentiert im beschriebenen Fall die Kosten des Einkaufs, der Fertigung, der Montage und Integration sowie der Verpackung.

Bild 6-7 zeigt einen Ausschnitt aus dem wiederverwendeten Pfadmodell. Hinter der Bezeichnung der Prozessschritte des Anwendungspfades sind die jeweiligen bereits bekannten Kosten aufgeführt.

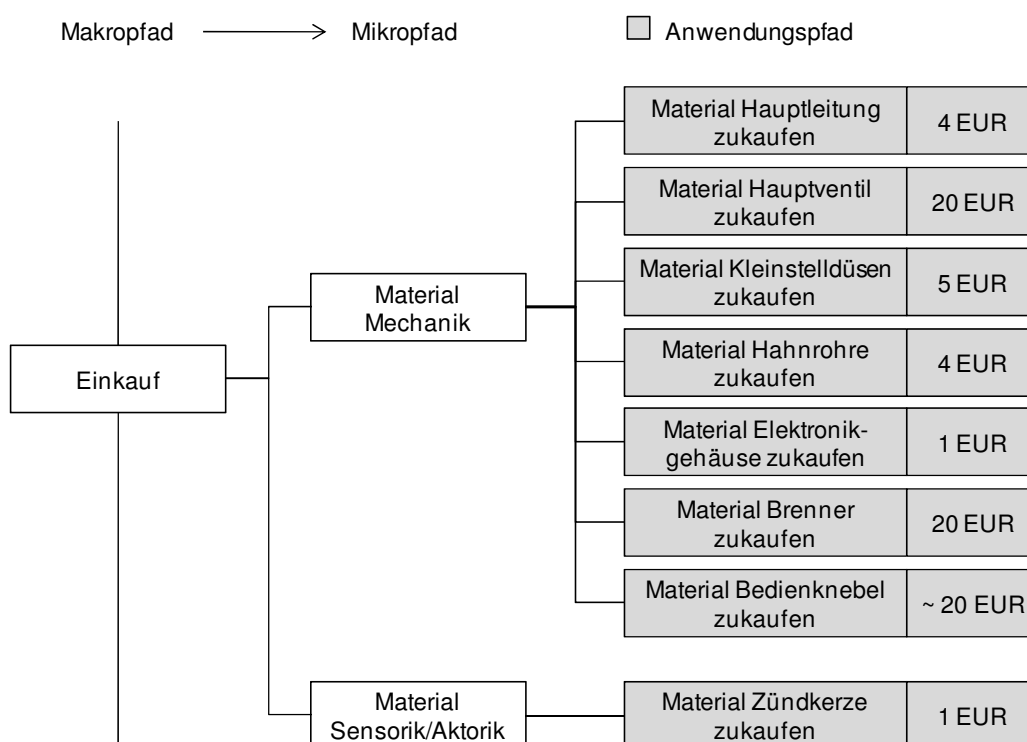


Bild 6-7: Wiederverwendbare Anteile des Pfadmodells des Ausgangsproduktes

Neben den bekannten Prozessschritten kommen durch die Änderung und das Hinzufügen von Komponenten noch neue Prozessschritte hinzu, für die die Kosten in der Folge abgeschätzt werden müssen. Diese müssen in das Pfadmodell integriert werden. Bild 6-8 zeigt die Prozessschritte des resultierenden Anwendungspfades und stellt sie den Komponenten in Form der quantifizierten DMM_{K-P_g} gegenüber. In dieser wurde, wie in Schritt 10 des Leitfadens beschrieben, der Beitrag der Prozessschritte zu den Komponenten dokumentiert. Außerdem führt die Abbildung diejenigen Prozessschritte auf, deren Kosten neu abzuschätzen sind.

		wiederverwendete Prozessschritte mit bekannten Kosten										veränderte/neue Prozessschritte mit noch zu schätzenden Kosten										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
Prozessschritte		Material Hauptleitung zukaufen	Hauptleitung, Hauptventil und Gashähne montieren	Material Hauptventil zukaufen	Material Kleinstelldüsen zukaufen	Material Hahnrohre zukaufen	Material Elektronikgehäuse zukaufen	Elektronikgehäuse fertigen und montieren	Material Brenner zukaufen	Brenner fertigen und montieren	Material Zündkerze zukaufen	Material Bedienknebel zukaufen	Montagematerial und Zubehör zukaufen und zusammenstellen	Material Verpackung zukaufen	Material regelbar angetriebenes Ventil zukaufen	Material Zündelektronik zukaufen	Material Antriebstreiber zukaufen	Material Thermoelement zukaufen	Material Schaltpult zukaufen	Material Verdrahtung zukaufen	Integration und Verpackung	
Komponenten	Hauptleitung	1	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07	
	regelbar angetriebenes Ventil	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	1	0	0	0	0	0	0	0,07
	Hauptventil	0	0,33	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Kleinstelldüsen	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Hahnrohre	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Zündelektronik	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	1	0	0	0	0	0	0,07
	Elektronikgehäuse	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Antriebstreiber	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	1	0	0	0	0	0,07
	Brenner	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Zündkerze	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Thermoelement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	1	0	0	0	0,07
	Schaltpult	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	1	0	0	0,07
	Bedienknebel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,07	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,07
	Verdrahtung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,07	0	0	0	0	0	1	0	0,07

Bild 6-8: Quantifizierte DMM_{K-Pg} der Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten

Zur Abschätzung der Kosten der einzelnen Prozessschritte oder auch zur direkten Kostenschätzung der korrespondierenden Komponenten können die in den Schritten 6, 7 und 8 referenzierten und im Anhang 9.4 detailliert beschriebenen Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation eingesetzt werden.

Beispielsweise können die Mehrkosten der, über einen Zulieferer bezogenen, Zündelektronik durch eine funktionsorientierte Kurzkalkulation mittels Function Costing abgeschätzt werden. Denn die vorzunehmenden Anpassungen bedingen keine Änderungen der Hardware, sondern lediglich eine Erweiterung der Software. So müssen die drei Teilfunktionen *Signal des Schaltpults auswerten*, *Signal des Thermoelements auswerten* und *Ventiltrieb nachregeln* ergänzend realisiert werden. Da es sich bei allen drei Funktionen um leicht zu implementierende Funktionen handelt, werden 70 EUR für die softwaretechnische Umsetzung jeder einzelnen Funktion veranschlagt. Bei einer Stückzahl von 100 Stück ergeben sich gut 2 EUR Mehr-

kosten für die Zündelektronik jeder einzelnen Gaskochmulde. Bei dieser Schätzung unberücksichtigt bleiben die Mehrkosten der Integration. Denn aus der erweiterten Funktionalität ergibt sich ein erhöhter Absicherungsbedarf, dessen Kosten in einem separaten Schritt abgeschätzt und im gezeigten Beispiel auf alle Komponenten der Gaskochmulde zu gleichen Teilen umgelegt werden.

6.1.5 Interpretation der Kostenschätzung

Bild 6-9 zeigt die aus den Prozessschätzkosten berechnete $DSM_{K(P)s}$ (vgl. Schritt 10 des Leitfadens). In ihr lassen sich durch Bildung der Zeilensummen die Komponentenschätzkosten ablesen. Diesen werden die Komponentenzielkosten gegenübergestellt. Die Zielkosten ergeben sich aus der Summe der Kosten der Komponenten im Ausgangsprodukt und den zuvor ermittelten zusätzlichen Komponentenzielkosten. In der rechten Spalte in Bild 6-9 ist die prozentuale Abweichung von Ziel- und Schätzkosten dokumentiert. Die größten Kostenabweichungen treten beim **regelbar angetriebenem Ventil**, dem **Schaltpult** und der **Verdrahtung** auf.

Neben den Komponenten, die ihre Zielkosten deutlich überschreiten, gibt es auch einige Komponenten, die ihre Kosten unterschreiten. In diesem Fall finden sich die größten Abweichungen beim Thermoelement. An diesem Beispiel wird ein Problem des Einsatzes von Funktionszielkosten deutlich: Das Thermoelement ist von entscheidender Bedeutung für die Realisierung der neuen, geforderten Funktion *Brennertemperatur regeln*, da es als Sensor ein wichtiger Bestandteil des Regelkreises ist. Somit wurde die Bedeutung des Thermoelements für die Erbringung der Gesamtfunktion in Bild 6-3 mit 15 % bewertet. Dieser Prozentwert ist direkt proportional zu den Zielkosten des Thermoelements. Allerdings handelt es sich bei einem Thermoelement um ein preisgünstiges Standardteil so dass diese Proportionalität zwischen Bedeutung und Kosten nicht aufrecht erhalten werden kann.

In Bild 6-9 fällt außerdem auf, dass jeder Zelle ein Wert von 0,13 EUR zugeschlagen wird. Diese Kosten ergeben sich aus den drei Prozessschritten die jeder der Komponenten in gleichen Teilen zugeschlagen werden (s. a. Bild 6-8). Für jede Komponente ergeben sich somit 14 mal 0,13 EUR, also 1,82 EUR, für Montagematerial, Verpackung und Integration. Die Erhöhung dieser Kosten hätte mit Hilfe des *Vernetzungsgrades* bereits im Vorfeld der Kostenschätzung ermittelt werden können. So erhöhte sich der Vernetzungsgrad der physikalischen Komponentenstruktur durch die Funktionserweiterung von 11,5 % auf 13,2 %.

Komponenten	DSM _{K(P)S}														Schätzkosten [EUR]	Kosten im Ausgangsprodukt [EUR]	zusätzliche Komponentenzielkosten [EUR]	Komponentenzielkosten gesamt [EUR]	Abweichung zwischen Zielkosten und Schätzkosten [%]
	Hauptleitung	regelbar angetriebenes Ventil (Gashähne, Magnetventil, Hahntrieb)	Hauptventil	Kleinstelldüsen	Hahnrohre	Zündelektronik	Elektronikgehäuse	Antriebstreiber	Brenner	Zündkerze	Thermoelement	Schaltpult	Bedienknebel	Verdrahtung					
Hauptleitung	4,57	0,57	0,57	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	7,16	6		6	19
regelbar angetriebenes Ventil	0,57	90,57	0,57	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	93,16	16*	32	48	94
Hauptventil	0,57	0,57	20,57	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	23,16	23		23	1
Kleinstelldüsen	0,13	0,13	0,13	5,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	6,85	6		6	14
Hahnrohre	0,13	0,13	0,13	0,13	4,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	5,85	5		5	17
Zündelektronik	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	31,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	32,85	29	20	49	-33
Elektronikgehäuse	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,85	2		2	43
Antriebstreiber	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	2,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	3,85		4	4	-4
Brenner	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	21,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	22,85	22		22	4
Zündkerze	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	3,13	0,13	0,13	0,13	0,13	4,85	4		4	21
Thermoelement	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,13	0,13	0,13	0,13	2,85		12	12	-76
Schaltpult	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	27,13	0,13	0,13	28,85	9	4	13	122
Bedienknebel	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	20,13	0,13	21,85	22	4	26	-16
Verdrahtung	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	12,13	13,85	6	4	10	39
															270,85	150	80	230	18

*Kosten der Gashähne des Ausgangsproduktes

Bild 6-9: Vergleich der Schätzkosten mit den Zielkosten

Auch bezüglich der weiteren, zuvor betrachteten Strukturmerkmale kann eine sehr positive Bilanz gezogen werden. Denn die mittels der Strukturmerkmale getroffene Kategorisierung der Komponenten kann durch die durchgeführte Kostenschätzung bestätigt werden. So bilden die in Bild 6-6 aufgeführten „potenziell kostenintensiven“ Komponenten tatsächlich die sieben teuersten Komponenten des Systems und verursachen zusammen 87,3 % der geschätzten Gesamtkosten.

Konzentriert man sich nun bei der Überarbeitung auf die teuersten Komponenten, die noch dazu eine sehr große Abweichung zwischen Ziel- und Schätzkosten aufweisen, so rücken bei vorliegendem Beispiel das regelbar angetriebene Ventil und das Schaltpult in den Fokus.

Den meisten Überarbeitungsspielraum bietet das regelbar angetriebene Ventil. Hier erscheint es sinnvoll die hochpreisige, spezialgefertigte Komponente eines Systemzulieferers durch

eine oder mehrere Standardkomponenten zu ersetzen. Um geeignete Komponenten für diesen Anwendungsfall zu finden erscheint es vielversprechend, Anleihen in anderen Branchen zu nehmen. So werden beispielsweise in der Anlagentechnik unterschiedlichste Formen regelbar angetriebener Ventile in großen Stückzahlen verbaut. Die konkrete technische Überarbeitung ist jedoch nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

6.2 Bewertung des Leitfadeneinsatzes

Bei der Anwendung des Leitfadens auf das Beispiel der Gaskochmulde konnte die methodische Unterstützung zahlreicher Schritte evaluiert werden. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die Schritte des Leitfadens äußerst flexibel einsetzbar sind. Dies bietet insbesondere erfahrenen Produktentwicklern die Möglichkeit, den Aufwand des Methodeneinsatzes an die Entwicklungsaufgabe anzupassen. Unerfahrene Produktentwickler hingegen bekommen durch die im Leitfaden dokumentierte, grundlegende Aneinanderreihung der Schritte eine Hilfestellung bei der Navigation durch einen zielkostenorientierten Entwicklungsprozess.

In Kapitel 4 wurden die Anforderungen an den zu entwickelnden Leitfaden des transdisziplinären Zielkostenmanagements in einem Lastenheft dokumentiert. Dieses gliedert sich in die Punkte Informationshandhabung, Kostenschätzung und -optimierung. Diese Kategorien werden nun auch zur Bewertung des Leitfadens herangezogen.

6.2.1 Informationshandhabung

Als grundlegendes Ziel der vorliegenden Arbeit wurde die methodische Unterstützung der Konzeptfindung und -entscheidung mechatronischer Produkte unter besonderer Berücksichtigung von Kostenaspekten formuliert. Besondere Beachtung findet dabei die Kostenwirkung der Partitionierung bzw. allgemeiner der Strukturgestaltung in der frühen Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs. Mit dem von MAURER [2007] entwickelten Multiple-Domain Matrix Ansatz wurde eine geeignete Basis zur Handhabung der hierfür relevanten Struktur- und Kosteninformationen auf Funktions-, Komponenten- und Prozessebene gefunden. Um jedoch allen Anforderungen aus Kapitel 4 zu begegnen musste er entscheidend erweitert werden (s. Kapitel 5.3).

Resultat ist ein durchgängiges Informationsmodell mit dem sowohl strukturelle als auch numerische Zusammenhänge und Informationen abgebildet werden können. So sind die in den einzelnen Schritten zu erarbeitenden Teilmatrizen unter einander vernetzt und durch die vorgestellten Transformationen und Formeln ineinander überführbar. Dies ermöglicht den schnellen Wechsel zwischen unterschiedlichen Blickwinkeln. Entscheidend ist dies beispielsweise für die schnelle Umrechnung von Funktions- und Prozessschätzkosten in Komponentenschätzkosten. Ein weiteres Beispiel sind die unterschiedlichen Ausprägungen der Komponentenstruktur (nativ, funktional und prozessual), die in der entwickelten MDM parallel gehandhabt werden können. Ihre rechnerverarbeitbare Darstellung in Form von Matrizen bildet die Basis für zielgerichtete Analysen und kostenorientierte Optimierungen des zu entwickelnden Produktes. Gerade in der frühen Phase der Entwicklung entstehen so zahlreiche Konzeptvarianten, die es zum Abschluss des disziplinübergreifenden Systementwurfs auch

hinsichtlich ihrer Kosten zu bewerten und zu vergleichen gilt. Auch dies wird durch den entwickelten Ansatz ermöglicht.

Aufgrund der Interdisziplinarität des disziplinübergreifenden Systementwurfs mechatronischer Produkte war die Unabhängigkeit von disziplinspezifischen Modellierungstechniken eine weitere Anforderung an die Informationshandhabung. Die Strukturdarstellung in Form von Matrizen und ihren zugehörigen Graphen erfolgt losgelöst von spezifischen Modellen, ermöglicht jedoch die schnelle Übernahme von Strukturinformationen in disziplinspezifische Modelle in einer späteren Phase der Entwicklung. Hier können die entstehenden Partialmodelle weiter konkretisiert werden und bei Bedarf detailliertere Informationen in das übergreifende Strukturmodell zurückgespielt werden. Auf diese Weise ist die zu Beginn der Entwicklung aufgestellte MDM über den kompletten Entwicklungsprozess einsetzbar und kann auch zu einem späteren Zeitpunkt noch als Analysebasis dienen.

Wie gezeigt wurde können Teilstrukturen aus vorangehenden Produktentwicklungen wieder verwendet werden. Dabei kann sogar die zeitliche Weiterentwicklung von Strukturen mit den erarbeiteten Hilfsmitteln abgebildet werden. So können vorgenommene Änderungen auch zu einem späteren Zeitpunkt nachvollzogen werden.

6.2.2 Kostenschätzung

Kern der durch den Leitfaden unterstützten Kostenschätzung sind die erarbeiteten Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation. Sie ermöglichen eine Kostenschätzung auf allen drei Ebenen des Informationsmodells. Das bedeutet, dass sowohl die Schätzung von Funktions- als auch Komponenten- und Prozesskosten unterstützt wird. Die Basismethoden haben dabei nicht zum Zweck die spezialisierten Einzelmethoden und umfassenden Methodiken der Disziplinen, wie beispielsweise COCOMO II, zu ersetzen. Diese finden teils jedoch erst in späteren Phasen sinnvollen Einsatz.

Die Basismethoden stellen in der frühen Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs für interdisziplinäre Teams eine aufwandsoptimierte Möglichkeit der Kostenschätzung dar, die für alle beteiligten Disziplinen zugänglich ist. Erzielt wurde diese Zugänglichkeit durch die Berücksichtigung disziplinspezifischer Anforderungen und die Kombination möglichst universell einsetzbarer Methoden.

Durch ihre Ableitung aus disziplinspezifischen Methoden können die bei der Anwendung der Basismethoden erstellten Formeln, Diagramme und Datenbanken in späteren Phasen weiterverwendet werden. Hier können sie dann direkt in die entsprechenden disziplinspezifischen Methoden einfließen und weiter konkretisiert werden.

Eine Aufwandsreduzierung der Kostenschätzung kann durch eine vorherige Strukturanalyse mittels der identifizierten kostenwirksamen Strukturmerkmale erreicht werden. Durch sie können potenziell kostentreibende Komponenten ebenso identifiziert werden wie potenziell kostengünstige Komponenten. Die Schätzung der kostentreibenden Komponenten sollte in der Folge deutlich aufwändiger gestaltet werden als die der kostengünstigen. Ursprünglich wurden die kostenwirksamen Strukturmerkmale zur Unterstützung der Kostenoptimierung zusammengestellt.

6.2.3 Kostenoptimierung

Zur Unterstützung der Kostenoptimierung wurden zwei Herangehensweisen erarbeitet. So wurde zum einen beschrieben, wie aus der gezielten Analyse der funktionalen und der prozessualen Komponentenstruktur Informationen abgeleitet werden können, die Hinweise auf Überarbeitungsschwerpunkte und Anregungen für Konzeptänderungen bieten. Zum anderen wurden kostenwirksame Strukturmerkmale ermittelt mit deren Hilfe Kostenschwerpunkte der funktionalen und der physikalische Komponentenstruktur identifiziert werden können.

Beide Ansätze der Kostenoptimierung erfüllen die Anforderung nach einer Erweiterung des kostengünstigen Konstruierens um die Berücksichtigung von Strukturaspekten. Die Entwickler bekommen beim Einsatz beider Methoden vielfältige Anregungen für Optimierungsschwerpunkte, die Aspekte des eingesetzten Funktionsprinzips genauso berücksichtigen wie der Prozessgestaltung, des Ressourceneinsatzes und der klassischen Gestaltüberarbeitung. Hinzu kommen Anregungen zur kostenorientierten Gestaltung der Produktstruktur die bereits von Beginn der Entwicklung an umgesetzt werden können.

Im Gegensatz zu klassischen Methoden des kostengünstigen Konstruierens sind diese neu erarbeiteten Ansätze sehr gut rechnerunterstützbar und bedeuten somit kaum zusätzlichen Aufwand wenn die Strukturen in Form des entwickelten Informationsmodells vorliegen.

Die hier dargelegte positive Bewertung des Leitfadens konnte im Rahmen eines Workshops auf der International Conference on Engineering Design (ICED 2009) an der Stanford University (Palo Alto, CA, USA) bestätigt werden. Im Rahmen dessen wurden der Leitfaden und seine integrierten Hilfsmittel mit einem internationalen Fachpublikum aus Forschung und Industrie diskutiert und Gedanken zur Erweiterung des Ansatzes gesammelt. Diese Anregungen werden zusammen mit weiteren in der Folge zu bearbeitenden Forschungsfragen im Ausblick des nachfolgenden Kapitels beschrieben.

7 Zusammenfassung

Dieses Kapitel bildet den Abschluss der vorliegenden Dissertation und fasst das auf Basis der Aufgabenstellung gewählte Vorgehen und die erarbeiteten Ergebnisse zusammen. Im Ausblick der Arbeit werden zahlreiche Möglichkeiten zur Erweiterung des vorgestellten Leitfadens diskutiert.

7.1 Bearbeitete Aufgabenstellung

Seit einigen Jahren hält die Mechatronik konsequent Einzug in die Erzeugnisse des klassischen Maschinen- und Anlagenbaus und eröffnet dabei auch Kosteneinsparungspotenziale. Konsequenz der Interdisziplinarität mechatronischer Produkte ist jedoch eine – im Vergleich zu klassischen mechanischen Erzeugnissen – erhöhte Komplexität.

Eine steigende Produktkomplexität schlägt sich in der Folge in einer gesteigerten Prozesskomplexität nieder. Um den damit verbundenen gestiegenen Anforderungen mechatronischer Produkte in Hinblick auf ihren Entwicklungsprozess zu begegnen, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Vorgehensmodelle, Methoden und Hilfsmittel entwickelt.

Weitestgehend vernachlässigt wurde bei diesem Trend der Transdisziplinarisierung jedoch das Kostenmanagement mechatronischer Produkte. Doch auch dabei werden erhöhte Anforderungen deutlich.

So stehen Entwickler mechatronischer Produkte einem stark erweiterten Lösungsraum gegenüber, aus dem sie geeignete Wirkprinzipien auswählen und kombinieren müssen. Um kostengünstige Lösungen zu generieren müssten sie bereits in sehr frühen Phasen wissen, welche Kombination von Wirkprinzipien und damit welche Ausprägung der Produktstruktur aus Kostengesichtspunkten zu favorisieren ist. Dies setzt die Kenntnis über Kostentreiber bzw. kostentreibende Strukturausprägungen mechatronischer Produkte voraus.

Zum Ende des disziplinübergreifenden Systementwurfs gilt es unterschiedliche Produktkonzeptvarianten auch hinsichtlich ihrer Kosten zu vergleichen um in späteren Phasen ein Konzept zu verfolgen, welches die Zielkostenvorgaben einzuhalten im Stande ist. Um den Aufwand der Kostenschätzung möglichst gering zu halten sollte das Entwicklerteam im Vorfeld in der Lage sein die potenziellen Kostentreiber der einzelnen Konzepte zu identifizieren um sich bei der Schätzung verstärkt auf sie konzentrieren zu können.

Für die eigentliche Schätzung bedarf es ebenfalls einer geeigneten Unterstützung. In der betrachteten Phase des disziplinübergreifenden Systementwurfs stehen nur wenige Informationen zur Verfügung, so dass sich Verfahren der Kurzkalkulation als geeignete Methode anbieten. Allerdings existieren in den beteiligten Disziplinen zahlreiche unterschiedliche Ansätze, die für die Kostenschätzung mechatronischer Produkte auf geeignete Weise zu kombinieren bzw. zu integrieren sind.

Schlussendlich sollten auf Basis einer Kostenschätzung Optimierungspotenziale erkennbar werden und Anstöße für kostensenkende Änderungen ermöglicht werden.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es ein interdisziplinäres Entwicklerteam in der Phase der Konzeptfindung und -entscheidung bei den beschriebenen Schritten zu unterstützen. Zu

diesem Zweck wurde ein mit Methoden und Hilfsmitteln hinterlegter Leitfaden entwickelt, welcher eine frühzeitige, aussagekräftige Kostenplanung, -kontrolle und -steuerung mechatronischer Produkte ermöglicht.

7.2 Vorgehen und Ergebnisse

Um die Situation des Kostenmanagements interdisziplinärer Produkte in der Industrie zu erfassen und daraus die an den zu entwickelnden Leitfaden zu stellenden Anforderungen zu sammeln, wurde zunächst eine **fragebogenbasierte Studie mit abschließendem Ergebnisworkshop** durchgeführt. Aus dieser Untersuchung wurde deutlich, dass sich die Notwendigkeit der vernetzten Betrachtung des Kostenmanagements mechatronischer Produkte nicht allein aus der Verknüpfung unterschiedlicher Disziplinen ergibt. Die Verteilung der Komplexitäts- und somit auch der Kostentreiber mechatronischer Produkte auf verschiedene Konkretisierungsebenen des Produktes (Funktionsebene, Komponentenebene) und in der Folge auch der Entwicklungs- und Herstellprozesse (Prozessebene, Ressourcenebene) erfordert ebenfalls eine integrierte Betrachtung. Außerdem zeigte sich deutlich, dass das verfügbare Wissen über den Zusammenhang von Kostenursache und Kostenwirkung in der Mechatronik im Vergleich zu rein mechanischen Entwicklungen noch stark unterentwickelt ist.

Vor der näheren Untersuchung dieses Zusammenhangs und der Entwicklung des Leitfadens zur Unterstützung des transdisziplinären Zielkostenmanagements wurde eine ausführliche **Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung und Technik** in den Forschungsbereichen „Kostenmanagement in der Produktentwicklung“, „Entwicklungsmethodik der Mechatronik“ und „Komplexitätsmanagement“ durchgeführt.

Auf Basis dieser Recherche und den zuvor erarbeiteten Untersuchungsergebnissen erfolgte die **Sammlung der Anforderungen** an den zu entwickelnden Leitfaden **in Form eines Lastenheftes**.

Den Kern des Forschungsprojektes und damit auch der vorliegenden Dissertation bildeten die **Entwicklung des generischen Zielkostenmanagement-Leitfadens und der ihm hinterlegten Methoden und Werkzeuge**.

Der Leitfaden stützt sich auf einen **Referenzprozess**, der aus insgesamt 14 Schritten aufgebaut ist. Dieser beschreibt zunächst den Übergang von den Anforderungen zur Funktionsstruktur, über die Disziplinstruktur weiter zu Komponentenstruktur bis hin zur Prozessstruktur. Auf diesem Grundgerüst setzt der unterstützte Zielkostenmanagementprozess auf. Ausgehend von den Zielkosten, die als Bestandteil der Anforderungen betrachtet werden, können Funktions- und Komponentenzielkosten ermittelt werden. Den Komponentenzielkosten werden im Laufe der Entwicklung Komponentenschätzkosten gegenüber gestellt. Diese können entweder direkt geschätzt werden oder aus zuvor ermittelten Funktions- bzw. Prozessschätzkosten berechnet werden. Aus dem Vergleich von Ziel- und Schätzkosten und der Berücksichtigung unterschiedlicher Ausprägungen der Komponentenstruktur können Optimierungsansätze abgeleitet werden.

In diesen Referenzprozess wurden zur Unterstützung der Entwickler verschiedene Hilfsmittel der Informationshandhabung, Kostenanalyse und Kostenoptimierung integriert.

Zur Handhabung der Strukturinformationen im Rahmen des Leitfadeneinsatzes wurde eine Multiple-Domain Matrix aufgesetzt welche die Funktions-, Komponenten-, Prozess- und Ressourcenebene umfasst. Der Multiple-Domain Ansatz wurde dahingehend erweitert, dass neben den Strukturinformationen auch Kosteninformationen abgebildet und bearbeitet werden können. In dem so entstandenen **Informationsmodell** sind die in den einzelnen Schritten zu erarbeitenden Teilmatrizen unter einander vernetzt und durch Transformationen und Formeln ineinander überführbar. Dies ermöglicht den schnellen Wechsel zwischen unterschiedlichen Blickwinkeln, wie zum Beispiel bei der Betrachtung funktionaler oder physikalischer Abhängigkeiten auf Komponentenebene oder auch der Umrechnung von Funktions- in Komponentenzielkosten. Die Strukturdarstellung in Form von Matrizen und zugehörigen Graphen ist zudem losgelöst von disziplinspezifischen Modellierungstechniken und dennoch allen technischen Disziplinen zugänglich. Die entwicklungsbegleitende Konkretisierung des Informationsmodells wird ebenso unterstützt wie der direkte Vergleich von Konzeptalternativen. Des Weiteren wird die Wiederverwendung von Informationsmodellen vergangener Entwicklungen ermöglicht, was zu einer erheblichen Verringerung des Aufwands für Dokumentation und Kostenanalyse führt.

Zur Unterstützung der **Kostenanalyse** wurden fünf so genannte Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation entwickelt. Diese leiten sich aus der Analyse und Integration diverser disziplinspezifischer Methoden ab und ermöglichen eine Kostenschätzung auf allen drei Ebenen des Informationsmodells. Sie stellen eine aufwandsoptimierte Möglichkeit der Kostenschätzung dar, die für alle beteiligten Disziplinen zugänglich ist. Mit Hilfe der Basismethoden durchgeführte Kostenschätzungen können im Laufe der weiteren Entwicklung konkretisiert werden und ihre Ergebnisse können in detailliertere disziplinspezifische Methoden einfließen.

Um den Aufwand der Kostenschätzung einzelner Komponenten gemäß ihrem zu erwartenden Anteil an den Gesamtkosten zu steuern, kann die Komponentenstruktur auf kostenwirksame Strukturmerkmale hin untersucht und so Kostentreiber identifiziert werden.

Insgesamt 15 kostenwirksame Strukturmerkmale wurden durch Strukturuntersuchung an neun industriellen Beispielsystemen identifiziert und dienen im Rahmen des Leitfadeneinsatzes primär der Unterstützung der **Kostenoptimierung**.

So wurden zur Unterstützung der Kostenoptimierung zwei unterschiedliche Herangehensweisen erarbeitet. Zum einen können aus der gezielten Analyse der funktionalen und der prozessualen Komponentenstruktur Informationen abgeleitet werden, die Hinweise darauf geben ob eine Kostenoptimierung tendenziell eher durch konzeptionelle Alternativen der Funktionserfüllung, die Überarbeitung von Elementen oder ihrer Schnittstellen, die Überarbeitung der Prozesse oder durch den Einsatz alternativer Ressourcen erreicht werden kann. Zum anderen können mittels der kostenwirksamen Strukturmerkmale Kostentreiber der funktionalen und der physikalischen Komponentenstruktur ermittelt werden und somit konkrete Angriffspunkte für kostensenkende Überarbeitungen identifiziert werden.

Zum Ende der Projektbearbeitung erfolgte die Evaluierung des Leitfadens durch seine Anwendung auf ein der Praxis entliehenes Entwicklungsbeispiel. Auf Basis dieses Einsatzes wurden die erzielten Potenziale des entwickelten Leitfadens herausgearbeitet.

7.3 Ausblick

Mit der Integration von Strukturanalysen und Ansätzen der Strukturoptimierung in die entwicklungsbegleitende Kalkulation und das kostengünstige Konstruieren beschreibt die vorliegende Arbeit neue Wege auf dem Gebiet des Zielkostenmanagements. Der vorgestellte Leitfaden begegnet mit seinen integrierten Hilfsmitteln den Anforderungen an ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement und ermöglicht die frühzeitige Kostenplanung, -kontrolle und -steuerung mechatronischer Produkte.

Sowohl der Gedanke der Transdisziplinarisierung als auch die Berücksichtigung von Strukturaspekten im Rahmen des Zielkostenmanagements sollten in folgenden Forschungsarbeiten weiter verfolgt werden.

Eine vielversprechende Erweiterungsmöglichkeit besteht in der Betrachtung gerichteter Abhängigkeiten. Denn bisher wurde bei der Aufstellung der physikalischen Komponentenvernetzung die Richtung der Wirkzusammenhänge nicht berücksichtigt. Auch die Art der Wirkbeziehung wurde nicht weiter konkretisiert. Die Einbeziehung beider Aspekte erweitert die Menge zu untersuchender Strukturmerkmale. Auch eine Ausweitung der untersuchten Kostenbasis verspricht interessante Ergebnisse. So sollten bei zukünftigen Untersuchungen Entwicklungs- und Betriebskosten berücksichtigt werden. Sogar eine Ausweitung auf eine komplette Lebenszykluskosten-Betrachtung ist denkbar.

Eine Ausweitung der Untersuchungen und die resultierende Sammlung weiterer kostenwirksamer Strukturmerkmale bietet die Basis zur Formulierung von Handlungsanweisungen zur kostenoptimierten Strukturgestaltung mechatronischer Produkte nach dem Vorbild von Design to Cost Richtlinien des klassischen Maschinenbaus.

Das dem Leitfaden zugrunde liegende Informationsmodell bietet die Möglichkeit der Erweiterung um neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der MDM Forschung. So ist zum Beispiel in Zukunft eine Verbesserung der Modellierung der zeitlichen Veränderung bzw. Konkretisierung von Strukturen zu erwarten [EBEN ET AL. 2008], die dann direkt in das Modell integriert werden kann.

Um den vorgestellten Leitfaden zur Anwendungsreife im industriellen Umfeld zu treiben ist eine durchgängige Rechnerunterstützung zu entwickeln. Ein erster Schritt in diese Richtung ist die Zusammenführung des Tools CoCoS, welches am Lehrstuhl zur Unterstützung der Pfadkostenrechnung entwickelt wurde, und dem Tool Loomeo, welches die MDM Modellierung und zahlreiche Strukturanalysen unterstützt [MOESER 2009].

Eine durchgängige Rechnerunterstützung erleichtert in der Folge die Evaluierung des Leitfadens an weiteren und umfangreicheren Entwicklungsprojekten.

8 Literaturverzeichnis

- ALBERS, A.; ENKLER, H.-G.; FRIETSCH, M.; SAUTER, C. (2009):
A new computer-aided approach to support designers in conceptual design of complex mecha-
tronic products. In: Proceedings of th 17th International Conference on Engineering Design
(ICED'09), Stanford, CA, USA, 24.08.-27.08.2009, S. 4/25-4/34
Stanford University: CDR, Design Society 2009. (CD-ROM)
- ANDRÁSFAL, B. (1991):
Graph Theory: Flows, Matrices.
Bristol: Adam Hilger 1991.
- ARNAOUT, A. (2001):
Anwendungsstand des Target Costing in deutschen Großunternehmen – Ergebnisse einer empi-
rischen Untersuchung.
Controlling 13 (2001) 6, S. 289-299.
- AXELSSON, J. (2000):
Cost models for electronic architecture trade studies. In: Proceedings of the 6th IEEE Interna-
tional Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS'00), Tokyo, Japan,
2000, S. 229-239.
- AXELSSON, J. (2006):
Cost models with explicit uncertainties for electronic architecture trade-off and risk analysis. In:
Proceedings of the 16th International Symposium of the International Council on Systems En-
gineering 2006, Orlando
- BAKSHI, S.; GAJSKI, D. (1997):
Hardware/software partitioning and pipelining. In: Proceedings of the 34th annual Conference
on Design Automation, Anaheim, CA, USA, 09.06.-13.06.1997, S. 713-716.
- BALAZOVA, M. (2004):
Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung.
Paderborn: Universität, Diss. 2004.
- BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. (2000):
Design rules – The power of modularity.
Cambridge, MA: MIT Press 2000.
- BAR-YAM, Y. (2003):
Unifying principles in complex systems. In: Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (Hrsg.): Converging
Technology (NBIC) for Improving Human Performance. S. 380-409.
New York: Springer 2003.
- BASHIR, H. A.; THOMSON, V. (2001):
Models for estimating design effort and time.
Design Studies 22 (2001), S. 141-155.

- BAUMBERGER, C. (2007):
Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten.
München: Dr. Hut 2007.
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.
- BAUMÖL, U. (1999):
Target Costing bei der Softwareentwicklung: eine Controlling-Konzeption und instrumentelle
Umsetzung für die Anwendungssoftware.
München: Vahlen 1999.
- BECK, K. (1996):
Smalltalk best practice patterns, Volume 1: Coding.
New Jersey: Prentice Hall 1996.
- BECKER, J. (1997):
DV-Verfahren zur Unterstützung frühzeitiger Kosteneinschätzungen. In: Männel, W. (Hrsg.):
Frühzeitiges Kostenmanagement.
Wiesbaden: Gabler 1997.
- BENDER, K.; DOMINKA, S.; KOÇ, A.; PÖSCHL, M.; RUSS, M.; STÜTZEL, B. (2005):
Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung.
Berlin: Springer 2005.
- BERTALANFFY, L.V. (1950):
An outline of general system theory.
The British Journal for the Philosophy of Science 1 (1950), S. 139-164.
- BICHLMAIER, C. (2000):
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39)
- BLESSING, L.; CHAKRABARTI, A. (2002):
DRM: A Design Research Methodology. In: The International Conference on The Science of
Design – The Scientific Challenge for the 21st Century, INSA, Lyon, France, March 2002.
- BOARDMAN, J.; SAUSER, B. (2006):
System of Systems - the meaning of of.
IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering, 2006, S.6.
- BOEHM, B. W. (1981):
Software Engineering Economics.
New Jersey: Prentice Hall 1981.
- BOEHM, B.; ABTS, C.; WINSOR BROWN, A.; CHULANI, S.; CLARK, B. K.; HOROWITZ, R.; MA-
DACHY, D. J.; REIFER, B. STEECE, B. (2000):
Software Cost Estimation with CoCoMo II.
New Jersey: Prentice Hall 2000.

- BOHNE, F. (1998):
Komplexitätskostenmanagement in der Automobilindustrie.
Wiesbaden: Dt. Universitätsverlag 1998.
Zugl. Augsburg: Universität, Diss. 1998.
- BOLLOBÁS, B. (1990):
Graph Theory.
New York: Springer 1990.
- BONGULIELMI, L.; HENSELER, P., PULS, C.; MEIER, M. (2001):
The K- & V-Matrix Method – An approach in analysis and description of variant products. In:
Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design (ICED'01), Glasgow,
S. 571-578.
Bury St. Edmunds: IMechE 2001.
- BOOTHROYD, G. (2005):
Assembly Automation and Product Design. 2. Auflage.
Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group 2005.
- BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. (2008):
Product Design for Manufacture and Assembly. 2. Auflage.
New York: Marcel Dekker 2008.
- BOSSEL, H. (1992):
Simulation dynamischer Systeme. 2. Auflage.
Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1992.
- BRALLA, J. G. (1986):
Handbook of Production Design for Manufacturing.
New York: McGraw-Hill 1986.
- BRAND, F. (2004):
Transdisziplinarität – Voraussetzung für naturwissenschaftlichen und mathematischen Erkenntnisgewinn? In: Brand, F.; Schaller, F.; Völker, H. (Hrsg.): Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven. Beiträge zur THESIS-Arbeitstagung im Oktober 2003 in Göttingen.
Göttingen: Universitätsverlag 2004.
- BRAUN, S. C.³⁹; BIEDERMANN W.; LINDEMANN, U. (2008):
Design to Cost: New Impulses for Target Costing. In: Marjanović, D.; Štorga, M.; Pavković, N.; Bojčetić, N. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Design Conference (DESIGN'08), Dubrovnik, Kroatien, 19.-22.05.2008, S. 317-326.
Glasgow: The Design Society 2008.
- BRAUN, S. C.³⁹; HELLENBRAND, D.; LINDEMANN, U. (2007):
Kostentransparenz in der Mechatronik - Eine Studie über Komplexitäts- und Kostentreiber mechatronischer Produkte (DOI 10.2370/322_261).
Aachen: Shaker Verlag Online 2007.

³⁹ Veröffentlichung der Autorin unter ihrem Mädchennamen

- BRAUN, S. C.³⁹; LINDEMANN, U. (2007):
Multiplanare Vernetzungen – Abhängigkeiten zwischen Produktkonzept, Produkterstellungsprozess und Ressourcenverbrauch in der Mechatronik. In: Gausemeier, J.; Ramming F.; Schäfer, W.; Trächtler, A.; Wallaschek, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop – Entwurf mechatronischer Systeme (EMS'07), Paderborn, Deutschland, 22.03.-23.03.2007, S. 319-334. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2007.
- BRAUN, S. C.³⁹; LINDEMANN, U. (2008):
The influence of structural complexity on product costs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM'08), Singapore, 08.12.-11.12.2008.
Singapore: IEEE 2008. (CD-ROM)
- BRAUN, T.; DEUBZER, F. (2007):
New variant management using multiple-domain mapping. In: Lindemann, U.; Danilovic, M.; Deubzer, F.; Maurer, M.; Kreimeyer, M. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International DSM Conference (DSM'07), München, 16.10.-18.10.2007
Aachen: Shaker 2007.
- BRÖHL, A.-P.; DRÖSCHEL, W. (1995):
Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden, 2. Auflage.
München: Oldenbourg Verlag 1995.
- BRIAND, L.; WÜST, J. (2001):
The impact of design properties on development cost in object-oriented systems.
IEEE Transaction on Software Engineering 27 (11) 2001, S. 963-986.
- BROWNING, T. R. (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, S. 292-306.
- BROWNING, T. R. (2009):
The Many Views of a Process: Towards a Process Architecture Framework for Product Development Processes.
Systems Engineering 12 (2009) 1, S. 69-90.
- 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, S. 428-442.
- BROY, M. (1998):
Informatik – Systemstrukturen und theoretische Informatik 2. 2. Auflage.
Berlin: Springer 1998.
- BRUNS, M. (1991):
Systemtechnik: ingenieurwissenschaftliche Methodik zur interdisziplinären Systementwicklung.
Berlin: Springer 1991.

- BUGGERT, W.; WIELPÜTZ, A. (1995):
Target Costing. Grundlagen und Umsetzung des Zielkostenmanagements.
München: Hanser 1995.
- BUNDSCHUH, M. (2005):
Aufwandschätzung von Softwareprojekten: Einsatz und Nutzen der Function-Point-Methode.
Project Management 1/2005, S. 23-30.
- BUUR, J. (1990):
A theoretical approach to mechatronics design.
Lyngby: Technical University of Denmark, Diss. 1990.
- CALINESCU, A.; EFSTATHIOU, J.; SIVADASAN, S.; SCHIRN, J.; HUATUCO, L. H. (2000):
Complexity in manufacturing: An information theoretic approach. In: McCarty, P.; Rakotobe-
Joel, T. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Complexity and Complex Sys-
tems in Industry, Warwick, UK, 19.09.-20.09.2000, S. 30-44.
University of Warwick 2000.
- CAMPBELL, M. (2007):
A computational approach for configuring mechatronic systems. In: Design Society SIG work-
shop on Mechatronics at the occasion of the 16th International Conference on Engineering De-
sign (ICED'07), Paris, Frankreich, 28.-31.08.2007.
Paris: Ecole Centrale, Design Society 2007.
- CARDOSO, J. (2006):
How to measure the control-flow complexity of web processes and workflows.
The Workflow Handbook, S. 199-212.
Hingham: WfMC 2005.
- CHILD, P.; DIEDERICHS, R.; SANDERS, F.-H.; WISNIOWSKI, S. (1991):
SMR Forum: The management of complexity.
Sloan Management Review 33 (1991) 1, S. 73-80.
- CHOI, S. H.; CHAN, A. M. M. (2004):
A virtual prototyping system for rapid product development.
Computer-Aided Design 36 (2004), S. 401-412.
- CHRISTIE, P.; STROOBANDT, D. (2000):
The interpretation and application of rent's rule.
IEEE Transactions on very large scale integration (VLSI) systems 8 (2000) 6, S. 639-648.
- CLARKSON, P. J.; MELO, A.; CONNOR, A. (2000):
Signposting for Design Process Improvement. In: Gero, J. S. (Ed.): Proceedings of the Interna-
tional Conference on Artificial Intelligence in Design (AID 2000), Worcester.
Cambridge: Worcester Polytechnic Institute 2000, pp 333-353.
- CLEMMONS, R. K. (2006):
Project estimation with use case points.
STSC crossTalk 2 (2006), S. 18-22.

- COOPER, R.; KAPLAN, R.S. (1988):
Measure costs right: Make the right decision.
Harvard Business Review 66 (September-October 1988), S. 96-103.
- COOPER, W. W.; SINHA, K.; SULLIVAN, R. (1995):
Accounting for complexity in costing high-technology manufacturing.
European Journal of Operational Research, Vol. 85 (1995), No. 2, S. 316–326.
- CROUCH, A. L. (1999):
Design-for-test for digital IC's and embedded core systems.
New Jersey: Prentice Hall 1999.
- DAENZER, W. F.; HUBER, F. (HRGS.) (2002):
Systems Engineering – Methodik und Praxis. 11. Auflage.
Verlag Industrielle Organisation 2002.
- DAIS, S. (2004):
Herausforderungen eines Automobilzulieferers.
Automobiltechnische Zeitschrift – ATZ, 106 (2004) (Sonderheft 100 Jahre VDI-FVT),
S. 18-20.
- DANILOVIC, M.; BÖRJESSON, H. (2001):
Managing the Multiproject Environment. In: Proceedings of the 3rd International DSM Conference (DSM'01), Cambridge, MA, USA, 29.10.-30.10.2001.
Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology 2001.
- DANILOVIC, M.; BROWNING, T. (2004):
A Formal Approach for Domain Mapping Matrices (DMM) to Complement Design Structure Matrices (DSM). In: Proceedings of the 6th International DSM Conference (DSM'04), Cambridge, UK.
Cambridge: University of Cambridge, Engineering Design Centre 2004.
- DETTMERING, H. (2008):
Disziplinübergreifendes Datenmanagement im autmobilen Entwicklungsprozess.
Göttingen: Sierke Verlag 2008.
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2008.
- DE WECK, O. L. (2007):
On the role of DSM in designing systems and products for changeability. In: Lindemann, U.; Danilovic, M.; Deubzer, F.; Maurer, M.; Kreimeyer, M. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International DSM Conference (DSM'07), München, Deutschland, 16.10.-18.10.2007
Aachen: Shaker 2007.
- DIEHL, H. (2009):
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme.
München: Technische Universität, Diss. 2009.

- DIERNEDER, S.; SCHEIDL, R. (2001):
Complexity analysis of systems from a functional and technical viewpoint.
Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2001.
Berlin: Springer 2001.
- DISLIS, C.; DICK, J. H.; DEAR, I. D.; AMBLER, A. P. (1995):
Test economics and design for testability.
New York, NY: Ellis Horwood 1995.
- DONG, Q.; WHITNEY, D. (2001):
Designing a requirement driven product development process. In: Proceedings of the DETC
2001: ASME 2001 International Design Engineering Technical Conferences. 13th International
Conference on Design Theory and Methodology, Pittsburgh.
Pittsburgh: ASME 2001.
- DÖRNER, D. (2006):
Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen. 5. Auflage.
Hamburg: Rowohlt Verlag 2006.
- DUDEN (1997):
Das Fremdwörterbuch.
Mannheim: Dudenverlag 1997.
- EBEN, K.; BIEDERMANN, W.; LINDEMANN, U. (2008):
Modeling structural change over time – Requirements and first methods. In: Kreimeyer, M.;
Lindemann, U.; Danilovic, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference
(DSM'08), Stockholm, Schweden, 11.11.-12.11.2008
München: Hanser 2008.
- EBERLE, R. (2000):
Varianten-Controlling in der Automobilindustrie.
Kostenrechnungspraxis 44 (2000) 6, S. 343-350.
- EBERT, C. (1999):
Technical controlling and software process improvement.
The Journal of Systems and Software 46 (1999), S. 25-39.
- EGBUNA, C. C.; BASSON, A. H. (2009):
Electric actuator selection design aid for low cost automation. In: Proceedings of the 17th Inter-
national Conference on Engineering Design (ICED'09), Stanford, CA, USA, 24.08.-27.08.2009,
S. 6/43-6/54
Stanford University: CDR, Design Society 2009. (CD-ROM)
- EHRENSPIEL, K. (2006):
Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Auflage.
München: Carl Hanser Verlag 2006.

- EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U. (2007):
Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6. bearb. Auflage.
Berlin: Springer 2007.
- EL-HAIK, B.; YANG, K (1999):
The components of complexity in engineering design.
IIE Transactions (1999) 31, S. 925-934.
- ENDEBROCK, K. (2000):
Ein Kosteninformationsmodell für die frühzeitige Kostenbeurteilung in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 2000.
Zugl. Bochum: Universität, Diss. 2000.
- EPPINGER, S. D.; PIMMLER, T. U. (1994):
Integration Analysis of Product Decompositions. In: Proceedings of the 1994 ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, Vol 68, S.343-351.
Minneapolis, USA: ASME 1994.
- ERIXON, G. (1998):
Modular function deployment – A method for product modularisation.
Stockholm: Royal Institute of Technology, KTH, Diss. 1998.
- ESD SYMPOSIUM COMMITTEE (2002):
Engineering Systems Research and Practice.
Massachusetts MIT Working Paper Series, 2002 (ESD-WP-2003-01.20-ESD Internal Symposium).
- EVANS, D. K.; LANHAM, J. D.; MARSH, R. (2006):
Cost estimation method selection: Matching user requirements and knowledge availability to methods. In: Proceedings of the 1st ICEC & IPMA Global Congress on Project Management, Ljubljana, 2006.
- EVERSHEIM, W. (1995):
Prozeßorientierte Unternehmensorganisation – Konzepte und Methoden zur Gestaltung „schlanker“ Organisationen.
Berlin: Springer 1995.
- EVERSSHEIM, W.; SCHUH, G. (2005):
Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.
Berlin: Springer 2005.
- FELGEN, L. (2007):
Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

- FERSHTMAN, C.; KALAI, E. (1993):
Complexity considerations and market behavior.
RAND Journal of Economics Vol. 24, Nr. 2, 1993, S. 224-235.
- FISCHER, D. (1983):
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: Technische Universität, Diss. 1983.
- 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.
- FLATH, M.; KESPOHL, H.; MÖHRINGER, S.; OBERSCHELP, O. (2000):
Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Lückel, J. (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 80, 2000.
- FÖLLINGER, O. (1994):
Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 10. Auflage.
Heidelberg: Hüthing Buch Verlag 1994.
- FRANZ, K.-P.; KAJÜTER, P. (1997):
Proaktives Kostenmanagement als Daueraufgabe. In: Franz, K.-P.; Kajüter, P. (Hrsg.): Kostenmanagement.
Stuttgart: Schäffer-Pöschel 1997.
- FRIEDMAN, M.; VOAS, J. (1995):
Software Assessment: Reliability, Safety, Testability.
New York: John Wiley & Sons 1995.
- GAHR, A. (2006):
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2006.
- GAHR, A.; LINDEMANN, U. (2005):
Individual Pathways – a cost management approach for product development in mass customization", In: Advanced Manufacturing Institute, HKUST (Hrsg.): MCPC 2005, 3rd Interdisciplinary World Congress on Mass Customization and Personalization. Hong Kong, China, 18.09.-21.09.2005.
Hong Kong: HKUST 2005.
- GAISER, B. (1998):
Prozesskostenrechnung und Activity Based Costing (ABC). In: Horváth & Partner GmbH (Hrsg.): Prozesskostenmanagement: Methodik und Anwendungsfelder.
München: Vahlen 1998.

- GARMUS, D.; HERRON, D. (2001):
Function Point Analysis.
Addison-Wesley 2001
- GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F. (2001):
Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen.
München: Carl Hanser Verlag 2001.
- GAUSEMEIER, J.; HAHN, A.; KESPOHL, H. D.; SEIFERT, L. (2006):
Vernetzte Produktentwicklung: Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking.
München: Carl Hanser Verlag 2006.
- GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; GREENYER, J.; KAHL, S.; POOK, S.; RIEKE, J. (2009A):
Management of cross-domain model consistency during the development of advanced mecha-
tronic systems. In: Proceedings of th 17th International Conference on Engineering Design
(ICED'09), Stanford, CA, USA, 24.08.-27.08.2009, S. 6/1-6/12
Stanford University: CDR, Design Society 2009. (CD-ROM)
- GAUSEMEIER, J.; STEFFEN, D.; DONOTH, J.; KAHL, S. (2009B):
Conceptual design of modularized advanced mechatronic systems. In: Proceedings of th 17th
International Conference on Engineering Design (ICED'09), Stanford, CA, USA, 24.08.-
27.08.2009, S. 4/263-4/274
Stanford University: CDR, Design Society 2009. (CD-ROM)
- GEHRKE, M. (2005):
Entwurf mechatronischer Systeme auf Basis von Funktionshierarchien und Systemstrukturen.
Paderborn: Universität, Diss. 2005.
- GIACHETTI, R.E.; ARANGO, J. (2003):
A design-centric activity-based cost estimation model for PCB fabrication.
Concurrent Engineering: Research and Applications 11 (2003) 2, S. 139-149.
- GLEICH, R. (1996):
Gemeinkostenmanagement – Marktorientierte Produkt- und Prozessgestaltung mit Target
Costing.
FVA-Forschungsreport 1996-1998.
- GÖPFERT, J. (1998):
Modulare Produktentwicklung: zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation.
Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1998.
Zugl. München: Universität, Diss. 1998.
- GRÄBLER, I. (2004):
Entwicklung mechatronischer Systeme als kundenindividuelle Massenprodukte.
Berlin: Springer 2004.
- GRIFFIN, A. (1993):
Metrics for measuring product development cycle time.
Journal of Product Innovation Management Vol 10 (1993), S. 112-125.

- GROMER, J. (2004):
Die Komplexität bestimmt der Kunde. Entwicklung – Interview.
Automobiltechnische Zeitschrift – ATZ, 1 (2004), S.40-43.
- GRUHN, V.; LAUE, R.; MEYER, F. (2006):
Berechnung von Komplexitätsmetriken für ereignisgesteuerte Prozessketten. In: Nüttges, M.; Rump, F.J.; Mendling, J. (Hrsg.): Proceedings of EPK2006 – Geschäftsprozessmanagement mit Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK2006), Wien, Österreich, Dezember 2006, S. 189-202.
- GRÜNEIBL, G. (2008):
Entwicklung von Lösungskonzepten zur Lagerung eines Lidar-Sensors zum Ausgleich statischer und dynamischer Veränderungen der Fahrzeuggelage.
Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2411.
München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2008.
- GRUNWALD, S. (2002):
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung.
München: Utz 2002.
- GUENOV, M. D. (2002):
Complexity and cost effectiveness measures for systems design. In: 2nd International Conference of the Manufacturing Complexity Network, Cambridge, UK, 09.04.-10.04.2002, S. 455-466.
Cambridge, UK: Institute for Manufacturing 2002.
- HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T. (1996):
Mechatronics – „What Is It, Why, and How?“ An Editorial
IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996, S. 1-4.
- HAUSER, J. R.; CLAUSING, D. (1988):
The House of Quality.
Harvard Business Review 66 (1988) 3, S. 63-73.
- HORVÁTH, P. (1996):
Gestaltung des Produktcontrollingsystems. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.):
Betriebshütte – Produktion und Management. 7. Auflage, S. 8/1-8/58.
Berlin: Springer 1996.
- HORVÁTH, P.; MÖLLER, K. (2005):
Integration von Target Costing, Target Pricing und Profit Planning. In: Jander, H.; Krey, A. (Hrsg.): Betriebliches Rechnungswesen und Controlling im Spannungsfeld von Theorie und Praxis, S. 363-382.
Hamburg: Kovac 2005.
- IDRI, A.; ABRAN, A.; MBARKI, S. (2004):
Validating and understanding software cost estimation models based on neural networks. In: Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications (ICTTA'04), Damascus, Syria, 19.04.-23.04.2004, S. 433-438.

- ISERMANN, R. (2007):
Mechatronische Systeme: Grundlagen. 2. Auflage.
Berlin: Springer 2007.
- JANSEN, S. (2007):
Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme.
Aachen: Shaker 2007.
Zugl. Bochum: Ruhr-Universität, Diss. 2006.
- JANTZEN, K. (2008):
Verfahren der Aufwandsschätzung für komplexe Softwareprojekte von heute.
Informatik Spektrum 31 (2008) 1, S. 35-49.
Berlin: Springer 2008.
- JARRATT, T. (2004):
A model-based approach to support the management of engineering change.
Cambridge, UK: University of Cambridge, Diss. 2004.
- JONES, C. (2007):
Estimating software costs: Bringing realism to estimating. 2. Auflage.
Columbus, OH: McGraw Hill 2007.
- JØRGENSEN, M.; SHEPPERD, M. (2007):
A Systematic Review of Software Development Cost Estimation Studies
IEEE Transactions on Software Engineering, 33 (2007) 1, S. 33-53.
- JUNGMAYR, S. (2003):
Improving testability of object-oriented systems.
Hagen : Fern-Universität, Diss. 2003.
- KAJÜTER, P.(2000):
Proaktives Kostenmanagement.
Wiesbaden: Gabler 2000.
- KANNAPAN, S. M. (1995):
Function metrics for engineering devices.
Applied Artificial Intelligence Vol 9 No 1 (1995), S. 45-64.
- KEATING, M. A. (1998):
Financial model for design reuse.
Design Reuse Group, Synopsis, Inc., 1998.
- KEHAT, E.; SHACHAM, M. (1973):
Chemical process simulation programs–2: Partitioning and tearing of systems flowsheets.
Process Technology International 18 (1973), S. 115-118.
- KILLING, J. P. (2002):
Understanding alliances: The role of task and organizational complexity. In: Contractor F. J.;
Lorange P. (Hrsg.): Cooperative Strategies in International Business, 2. Auflage, S. 55-68.
Oxford: Elsevier Science 2002.

KINKEL, S.; LAY, G. (2004):

Automobilzulieferer in der Klemme – Vom Spagat zwischen strategischer Ausrichtung und Auslandsorientierung. In: Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung. Fraunhofer ISI. PI-Mitteilung Nr. 32., März 2004.

KLEER, M.; BOEKE, E. (2003):

Arthur D. Little Studie – Best Practice in der Produktentwicklung 2003 – Zusammenfassung Studienergebnisse. Von: Arthur D. Little GmbH: Press_Ergebnisse_Studie_DtC_20031203.ppt. München, 2003

KORTLER, S.; KREIMEYER, M.; LINDEMANN, U. (2009):

A planarity-based complexity metric. In: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09), Stanford, CA, USA, 24.08.-27.08.2009, S. 6/31-6/42
Stanford University: CDR, Design Society 2009. (CD-ROM)

KREIMEYER, M. (2010):

A structural measurement system for engineering design processes.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2010.

KREIMEYER, M.; KÖNIG, C.; BRAUN, T. (2008):

Structural metrics to assess processes. In: Kreimeyer, M.; Lindemann, U.; Danilovic, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International DSM Conference (DSM'08), Stockholm, Schweden, 11.11.-12.11.2008.
München: Hanser 2008.

KUGELER, M.; VIETING, M. (2005):

Gestaltung einer prozessorientiert(er)en Aufbauorganisation. In: Becker, J.; Kugeler, M.; Rosemann, M. (Hrsg.): Prozessmanagement – Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung, 5. Auflage.
Berlin: Springer 2005.

LEIDICH, E.; JURKLIES, I.; SCHUMANN, F. J. (2001):

Fuzzybasierte Kostenprognose in der Konzeptphase.
Konstruktion (2001) 3, S. 83-87.

LEUNG, H.; FAN, Z. (2002):

Software cost estimation.
Handbook of Software Engineering.
Hong Kong: Polytechnic University 2002.

LI, M.; STOKES, C. A.; FRENCH, M. J.; WIDDEN, M. B. (1993):

Function-Costing: Recent developments. In: Proceedings of the 9th International Conference on Engineering Design (ICED'93), The Hague, 17.08.-19.08.1993, S. 1123-1129.

LINDEMANN, U. (2007):

A vision to overcome “chaotic” design for X processes in early phases. In: Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED'07), 28.08.-30.08.2007, Paris, Frankreich, S. 231-232.
Paris: Design Society 2007.

- LINDEMANN, U. (2009):
Methodische Entwicklung technischer Produkte. 3. Auflage.
Berlin: Springer 2009.
- LINDEMANN, U.; MAURER, M.; BRAUN, T. (2008):
Structural complexity management: An approach for the field of product design. 1. Auflage.
Berlin: Springer 2008.
- LIPPOLD, C. (2001):
Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme.
Aachen: Shaker, 2001.
Zugl. Bochum: Ruhr-Universität, Diss. 2000.
- LÜCKEL, J.; KOCH, T.; SCHMITZ, J. (2000):
Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: VDI-Tagung „Mechatronik – Mechanischelektrische Antriebstechnik“, Wiesloch, 29.03.-30.03.2000.
Düsseldorf : VDI Verlag 2000.
- LUTZ, H., WENDT, W. (1998):
Taschenbuch der Regelungstechnik.
Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch 1998.
- MAIER, A.; KREIMEYER, M.; HERFELD, U.; DEUBZER, F.; LINDEMANN, U.;
CLARKSON, P. J. (2006):
Reflecting communication: A key factor for successful collaboration between embodiment design and simulation. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International Design Conference (DESIGN'06), Dubrovnik, Kroatien, 15.05.-18.05.2006, S. 1483-1490.
Glasgow: The Design Society 2006.
- MÄNNEL, W. (1997):
Einsatz von Relativkosten-Katalogen für das konstruktionsbegleitende Kostenmanagement. In: Männel, W. (Hrsg.): Frühzeitiges Kostenmanagement.
Wiesbaden: Gabler 1997.
- MANSON, S. M. (2001):
Simplifying complexity: a review of complexity theory.
Geoforum 32 (2001), S. 405-414.
- MARTI, M. (2007):
Complexity management: optimizing product architecture in industrial products.
Wiesbaden: Gabler Verlag 2007.
Zugl. St. Gallen: Universität, Diss. 2007.
- MAURER, M. (2007):
Structural awareness in complex product design.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

- MCMAHON, M.; PRASANNAPPA, R.; BARAS, J.; ZHANG, G.; KEBEDE, A.; MENDICINO, P. (1992):
Evaluation of product and process design in electronics. In: Proceedings of the 13th
IEEE/CHMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium,
28.09.-30.09.1992, S. 266-271.
- MICHAEL, R.; JANDT, J.; TORSPECKEN, H.-D. (1998):
Neue Formen der Kostenrechnung mit Prozesskostenrechnung. Kostenrechnung II. 4. Auflage.
München, Wien: Hanser 1998.
- MICHELS, J. S. (2007):
Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2007.
Zugl. Paderborn: Universität, Diss. 2007.
- MOESER, C. (2009):
Potenziale der Erweiterung der Pfadkostenrechnung um Methoden der Matrix- und
Grafentheorie.
Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2437.
München: Technische Universität, Lehrstuhl für Produktentwicklung 2009.
- MÖHRINGER, S. (2005):
Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2005, Band 156.
Zugl. Paderborn: Universität, Habil. 2005.
- MÖLLER, K. (2003):
Kosteninformationssystem für die Antriebstechnik.
Abschlussbericht des FVA Forschungsvorhabens Nr. 368, Heft 704.
Frankfurt: FVA 2003.
- NEFF, T. (2002):
Front Load Costing: Produktkostenmanagement auf der Basis unvollkommener Information.
Wiesbaden: DUV 2002.
- NIEMAND, S. (1996):
Target Costing für industrielle Dienstleistungen.
München: Vahlen 1996.
- NIBL, A. (2006):
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 64)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2006.
- NOTH, T.; KRETZSCHMAR, M (1984):
Aufwandschätzung von DV-Projekten – Darstellung und Praxisvergleiche der wichtigsten
Verfahren.
Berlin: Springer 1984.

- OMG (OBJECT MANAGEMENT GROUP) (2009):
OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™). Version 1.1. Standard document
[entnommen am 21.01.2009, URL: <http://www.omg.org/spec/SysML/1.1>]
- ONG, N. S. (1995):
Manufacturing cost estimation for PCB assembly: An activity-based approach.
International Journal Production Economics 38 (1995) 2-3, S. 159-172.
- ONG, N. S.; LIM, L. E. N. (1993):
Activity-based cost-modelling procedures for PCB assembly.
International Journal of Advanced Manufacturing Technology 8 (1993) 6, S. 396-406.
- OSSIMITZ, G. (2000):
Entwicklung systemischen Denkens. Theoretische Konzepte und empirische Untersuchungen.
München: Profil Verlag, 2000.
- OUYANG, C.; HEINEKEN, H. T.; KHARE, J.; SHAIKH, S.; D'ABREU, M. (2000):
Maximizing wafer productivity through layout optimizations. In: Proceedings of the 13th International Conference on VLSI Design, Januar 2000, S. 192-197.
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H. (2005):
Konstruktionslehre. 6. Auflage.
Berlin: Springer 2005.
- PAHL, G.; RIEG, F. (1984):
Kostenwachstumsgesetze für Baureihen.
München: Hanser 1984.
- PASSING, U.; STRAHRINGER, S.; RAPPOLD, P. (2003):
Prozessorientierte Experten-Aufwandschätzungen für Softwareprojekte: Einführung und Umsetzung bei der Bausparkasse Schwäbisch-Hall AG.
Information Management & Consulting 18 (2003) 4, S. 25-32.
- PATZAK, G. (1982):
Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken.
Berlin: Springer 1982.
- PICKEL, H. (1989):
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 1988.
- PINK, A.; KOßMANN, H.; BROY, M.; KARGL, E.; LEGALLY, M.; SCHIMPER, T. (2002):
Software-Entwicklung für Kommunikationsnetze.
Berlin: Springer 2002.
- PONN, J. (2007):
Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 2007.

- PONN, J.; LINDEMANN, U. (2008):
Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte.
Berlin: Springer 2008.
- PRECHELT, L.; UNGER, B.; PHILIPPSEN, M.; TICHY, W. (2003):
A controlled experiment on inheritance depth as a cost factor for code maintenance.
The Journal of Systems and Software 65 (2003), S. 115-126.
- PUHL, H. (1999):
Komplexitätsmanagement.
Kaiserslautern: Univ. Kaiserslautern, Diss. 1999.
- PULM, U. (2004):
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München Band 56).
zugl. München: Technische Universität, Diss. 2004.
- RAGAN, D.; SANDBORN, P.; STOAKS, P. (2002):
A detailed cost model for concurrent use with hardware/software co-design. In: Proceedings of the IEEE/ACM Design Automation Conference, New Orleans, LA, June 2002, S. 269-274.
- RAO, S.; HASKELL, B.; YEE, I (1994):
Trade-off Analysis on Cost and Manufacturing Technology of an Electronic Product: Case Study.
Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 5 (1994), S. 219-228.
- RAUSCH, A (2004):
Projektmanagement. In: Grundlagen des Software Engineering. Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik, Wintersemester 2004/2005.
- REIß, T.; SCHULLER, J. (2009):
Anforderungsmanagement: Der Kernprozess einer Mechatronikentwicklung. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme: Grundlagen, Methoden, Werkzeug, Adaption, Selbstoptimierung, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung. 6. Paderborner Workshop, Paderborn, 02.04.-03.04.2009, S. 203-216.
Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe 2009, Bd. 250.
- RINCON, A.; CHERICHETTI, C.; MONZEL, J.; STAUFFER, D.; TRICK, M. (1997):
Core design and system-on-a-chip integration.
IEEE Design and Test of Computers, October-December 1997, S. 26-35.
- RÖSLER, F. (1996):
Target Costing für die Automobilindustrie.
Wiesbaden: Gabler 1996.
- SANDBORN P. A.; MORENO, H. (1994):
Conceptual design of multichip modules and systems.
Berlin: Springer 1994.

- SAUERMAN, H. J. (1986):
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaus.
München: Technische Universität, Diss. 1986.
- SCHEFFLER, M. (2001):
Cost vs. quality trade-off for high-density packaging of electronic systems.
Zürich: Swiss Federal Institute of Technology, Diss. 2001.
- SCHEFFLER, M.; AMMANN, D.; THIEL, A.; HABIGER, C.; TRÖSTER, G. (1998):
Modeling and optimizing the costs of electronic systems.
IEEE Design & Test of Computers 15 (1998) 3, S. 20-26.
- SCHLINK, H (2004):
Bestimmung von Funktionskosten – Grundlagen für die Kostenorientierte Entwicklung technischer Produkte.
Wiesbaden: Gabler 2004.
Zugl. Ilmenau: Technische Universität, Diss. 2004.
- SCHOLL, K. (1998):
Konstruktionsbegleitende Kalkulation – computergestützte Anwendung von Prozeßkostenrechnung und Kostentableaus.
München: Vahlen 1998.
Zugl. Stuttgart: Universität, Diss. 1998.
- SCHÖNER, H.-P. (2006):
Mechatronik. In: Gevatter, H.-J.; Grünhaupt, U. (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil, S. 9-21.
Berlin: Springer 2006.
- SCHUH, G.; SCHWENK, U. (2001):
Produktkomplexität managen: Strategien, Methoden, Tools.
München: Hanser 2001.
- SCHUMANN, F. J. (2001):
Methoden und Werkzeuge zur Integration der kundengerechten Wertgestaltung in die Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses.
Chemnitz: TU, Diss. 2001.
- SEIBERT, S. (2005):
Estimating Software Costs: Bringing Realism to Estimating.
Project Management 1/2005, S.9-13
- SEIDENSCHWARZ, W. (1991A):
Target Costing – Schnittstellenbewältigung mit Zielkosten. In: Horváth, P. (Hrsg.): Synergien durch Schnittstellencontrolling, S. 191-209.
Stuttgart: Poeschl 1991.

- SEIDENSCHWARZ, W. (1991B):
Target Costing und Prozesskostenrechnung. In: IFUA Horváth & Partner (Hrsg.): Prozesskostenmanagement – Methodik, Implementierung, Erfahrungen, S.47-70.
München: Vahlen 1991.
- SEIDENSCHWARZ, W. (1993):
Target Costing - Marktorientiertes Zielkostenmanagement.
München: Vahlen 1993.
- SEIDENSCHWARZ, W. (2003):
Target Costing. In: Diller, H.; Herrmann, A. (Hrsg.): Handbuch Preispolitik: Strategien – Planung – Organisation – Umsetzung, S.437-454.
Wiesbaden: Verlag Dr. Th. Gabler 2003.
- SEIFFERT, U.; RAINER, G. (2008):
Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz – Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis.
Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2008.
- SEURING, S. (2001):
Supply Chain Costing.
München: Verlag Vahlen 2001.
- SHEPPERD, M.; SCHOFIELD, M. (1997):
Estimating software project effort using analogies.
IEEE Transaction on Software Eng., vol. 23, no. 12, Nov. 1997.
- SNEED, H. M. (1991):
Softwarewartung. Softwarewartung und -wiederverwendung.
Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller 1991.
- SNEED, H. M. (1994):
Bessere Projektaufwandsschätzung durch Einsatz von Function-, Data- und Object-Point-Metriken. In: Tagungsband „KAIZEN – Kontinuierliche Software-Projekt-/Prozessverbesserung durch Bewertung und Messen“, Zürich, Schweiz, August 1994, S. 3/1-3/23
- STAMBOLLIAN, A.; ABRAN, A. (2006):
Survey of automation tools supporting COSMIC-FFP – ISO 19761. In: Abran, A.; Bundschuh, M.; Büren, G.; Dumke, R. R. (Hrsg.): Applied Software Measurement IWSM/MetriKon 2006, S.435-454
Aachen: Shaker Verlag 2006
- STEFFEN, D. (2006):
Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme.
Paderborn: Universität, Diss. 2006.
- STEINMEIER, E. (1999):
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 28)
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 1998.

STEINWEG, C. (1999):

Projektkompass Softwareentwicklung: geschäftsorientierte Entwicklung von IT-Systemen.
2. Auflage.
Wiesbaden: Vieweg 1999.

STEITZ, T. (1992):

Methodik zur markorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung.
Karlsruhe: Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik 1992.

STETTER, R.; NIEDERMEIER, M. (2007):

Approaches towards lean products. In: Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED'07), 28.08.-30.08.2007, Paris, Frankreich.
Paris: Design Society 2007. (CD-ROM)

STEWART, D. (1962):

On an approach to the analysis of the structure of large systems of equations.
SIAM Review 5 (1962), S. 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, S. 79-83.

STÖSSER, R. (1999):

Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33).
Zugl. München: Technische Universität, Diss. 1999.

SUH, N. P. (1998):

Axiomatic design theory for systems.
Research in Engineering Design 10 (1998), S. 189-209.

SUMMERS, J. D.; SHAH, J. J. (2003):

Developing Measures of Complexity for Engineering Design. In: Proceedings of DETC'03: ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences, Design Theory and Methodology Conference (DTM), Chicago, IL, USA, 2003.

TANAKA, M. (1989):

Cost planning and control systems in the design phase of a new product. In: Monden, Y.; Sakurai, M. (Hrsg.): Japanese management accounting: a world class approach to profit management, S. 49-71.
Portland: Productivity Press 1989.

TANNER, R. (1995):

Konzeption eines ressourcenorientierten Prozesskostenrechnungssystems.
Sulgen: Niggli 1995.

- TAYLOR, T. (1985):
Handbook of Electronics Industry.
New York: John Wiley & Sons 1985.
- TEICH, J.; HAUBELT, C. (2007):
Digitale Hardware/Software-Systeme. 2. Auflage.
Berlin: Springer 2007.
- TJALVE, E. (1978):
Systematische Formgebung für Industrieprodukte.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1978.
- TRICHY, T.; SANDBORN, P.; RAGHAVAN, R.; SAHASRABUDHE, S. (2001):
A new Test/Diagnosis/Rework Model for Use in Technical Cost Modeling of Electronic Systems Assembly. In: International Test Conference (ITC'01), 2001, S.1108-1117.
- ULRICH, K. (1995):
The role of product architecture in the manufacturing firm.
Research Policy, 24 (3) 1995, S. 419-440.
- ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. (2003):
Product design and development. 3. Auflage.
New York: Mcgraw-Hill Professional 2003.
- VAIDYA, J. (1995):
Motor selection for actuation systems. In: Proceedings of Electronics Insulation Conference and Electrical & Coil Winding Conference, Rosemont, 1995, S. 385-391.
- VAN DER AALST, W.; VAN HEE, K. (2004):
Workflow management: models, methods, and systems.
Cambridge, MA: MIT Press 2004.
- VAN WIE, M. J.; GREER, J. L.; CAMPBELL, M. I.; STONE, R. B.; WOOD, K. L. (2001):
Interfaces and Product Architecture. In: Proceedings of DETC '01: ASME 2001 International Design Engineering Technical Conferences And Computers and Information in Engineering Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 09.09.-12.09.2001.
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (2004):
Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI-Richtlinie 2206).
Berlin: Beuth 2004.
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1997A):
Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien
(VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1).
Berlin: Beuth 1997.
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1997B):
Technisch-wirtschaftliches Konstruieren (VDI-Richtlinie 2225).
Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1993):
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
(VDI-Richtlinie 2221).
Berlin: Beuth 1993.
- VIVACE (2004):
Requirements/Cost Driven System Development – RCDS. In: Design to Decision Objectives – DTDO, 2004.
- VOGELEZANG, F (2006):
Using COSMIC-FFP for sizing, estimating and planning in an ERP environment. In: Abran, A.; Bundschuh, M.; Büren, G.; Dumke, R. R. (Hrsg): Applied Software Measurement IWSM/MetriKon 2006, S.327-341.
Aachen: Shaker Verlag 2006
- VRANKEN, H. P. E.; WITTEMAN, M. F.; WUIJTSWINKEL, R. VAN (1996):
Design for testability in hardware-software systems.
IEEE Design & Test, vol. 12, Jan.-Mar. 1996, S. 79-81.
- WARFIELD, J. N. (1973):
Binary Matrices in System Modeling.
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-3 (1973) 5, S. 441-449.
- 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, Paderborn, 22.03.-23.03.2007, S. 335-349.
Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe 2007, Bd. 210.
- WARTZACK, S. (2001):
Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.
Zugl. Erlangen-Nürnberg: Friedrich-Alexander Universität, Diss. 2000.
- WEBER, C. (2005):
What is „Complexity“? In: Samuel, A.; Lewis W. (Hrsg.): Proceedings the 15th International Conference on Engineering Design (ICED'05), Melbourne, Australia, 15.08.-18.08.2005. Melbourne: Design Society 2005. (CD-ROM)
- WESTERKÄMPER, E.; BULLINGER, H.-J.; HORVÁTH, P.; ZAHN, E. (2001):
Montageplanung – effizient und marktgerecht.
Berlin: Springer 2001.
- YASSINE, A.; WHITNEY, D.; DALEIDEN, S.; LAVINE, J. (2003):
Connectivity maps: Modeling and analysing relationships in product development processes. Journal of Engineering Design 14 (2003) 3, S. 377-394.

ZHANG, Z.; LUO, Q. (2007):

A grey measurement of product complexity. In: Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference, 7.10.-10.10.2007, S. 2176-2180

ZRIM, G.; MALETZ, M.; LOSSACK, R. (2006):

Experience based cost management in the early stages of product development. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International Design Conference (DESIGN'06), Dubrovnik, Kroatien, 15.05.-18.05.2006, S. 1569-1574.
Glasgow: The Design Society 2006.

9 Anhang

9.1 Nomenklatur der Teilmatrizen

DSM	Design Structure Matrix
DSM ₁	DSM zur Lösungsalternative 1 (kombinierbar mit weiteren Indizes)
DSM _{t1}	DSM zum Zeitpunkt t1 (kombinierbar mit weiteren Indizes)
DSM _{F(F)}	DSM der nativen Funktionsstruktur
DSM _{K(K)}	DSM der nativen, physikalischen Komponentenstruktur
DSM _{K(K)s}	DSM der nativen Komponentenstruktur mit integrierten Schätzkosten
DSM _{K(F)}	DSM der funktionalen Komponentenstruktur (berechnet aus DMM _{F-K})
DSM _{K(F)s}	DSM der funktionalen Komponentenstruktur mit integrierten Schätzkosten
DSM _{K(F)z}	DSM der funktionalen Komponentenstruktur mit integrierten Zielkosten
DSM _{K(P)}	DSM der prozessualen Komponentenstruktur (berechnet aus DMM _{K-P})
DSM _{K(P)s}	DSM der prozessualen Komponentenstruktur mit integrierten Schätzkosten
DSM _{P(P)}	DSM der nativen Prozessstruktur
DSM _{R(R)}	DSM der nativen Ressourcenstruktur
$\vec{f}_g, \text{diag } \vec{f}_g$	Vektor der Funktionsgewichte, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{f}_s, \text{diag } \vec{f}_s$	Vektor der Funktionsschätzkosten, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{f}_z, \text{diag } \vec{f}_z$	Vektor der Funktionszielkosten, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{k}_g, \text{diag } \vec{k}_g$	Vektor der Komponentengewichte, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{k}_s, \text{diag } \vec{k}_s$	Vektor der Komponentenschätzkosten, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{k}_z, \text{diag } \vec{k}_z$	Vektor der Komponentenzielkosten, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{p}_s, \text{diag } \vec{p}_s$	Vektor der Prozessschätzkosten, zugehörige Diagonalmatrix
$\vec{r}, \text{diag } \vec{r}$	Vektor der Ressourcenkostensätze, zugehörige Diagonalmatrix
DMM	Domain Mapping Matrix
DMM ₁	DMM zur Lösungsalternative 1 (kombinierbar mit weiteren Indizes)
DMM _{t1}	DMM zum Zeitpunkt t1 (kombinierbar mit weiteren Indizes)
DMM ^T	Transponierte DMM (kombinierbar mit weiteren Indizes)
DMM _{F-K}	DMM der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten
DMM _{F-Kg}	DMM _{F-K} mit integrierter Gewichtung
DMM _{K-P}	DMM der Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten

DMM _{K-Pg}	DMM _{K-P} mit integrierter Gewichtung
DMM _{P-R}	DMM der Verknüpfung von Prozessschritten und Ressourcen
DMM _{P-Rs}	DMM _{P-R} mit integriertem geschätztem Ressourcenverzehr

9.2 Kompletter Zielkostenmanagement-Leitfaden

In diesem Kapitel erfolgt die detaillierte Beschreibung der 14 Schritte des entwickelten Leitfadens. Die Einordnung der Schritte in den Zielkostenmanagement-Referenzprozess erfolgt gemäß der unten stehenden Nummerierung (Bild 9-1).

Sonderfälle bilden die Schritte 2a und 2b sowie 5a und 5b. 2a und 2b kennzeichnen die parallele Erstellung zweier unterschiedlicher Ausprägungen der Komponentenstruktur. 5a und 5b beschreiben zwei unterschiedliche Wege zur Bestimmung der Komponentenzielkosten.

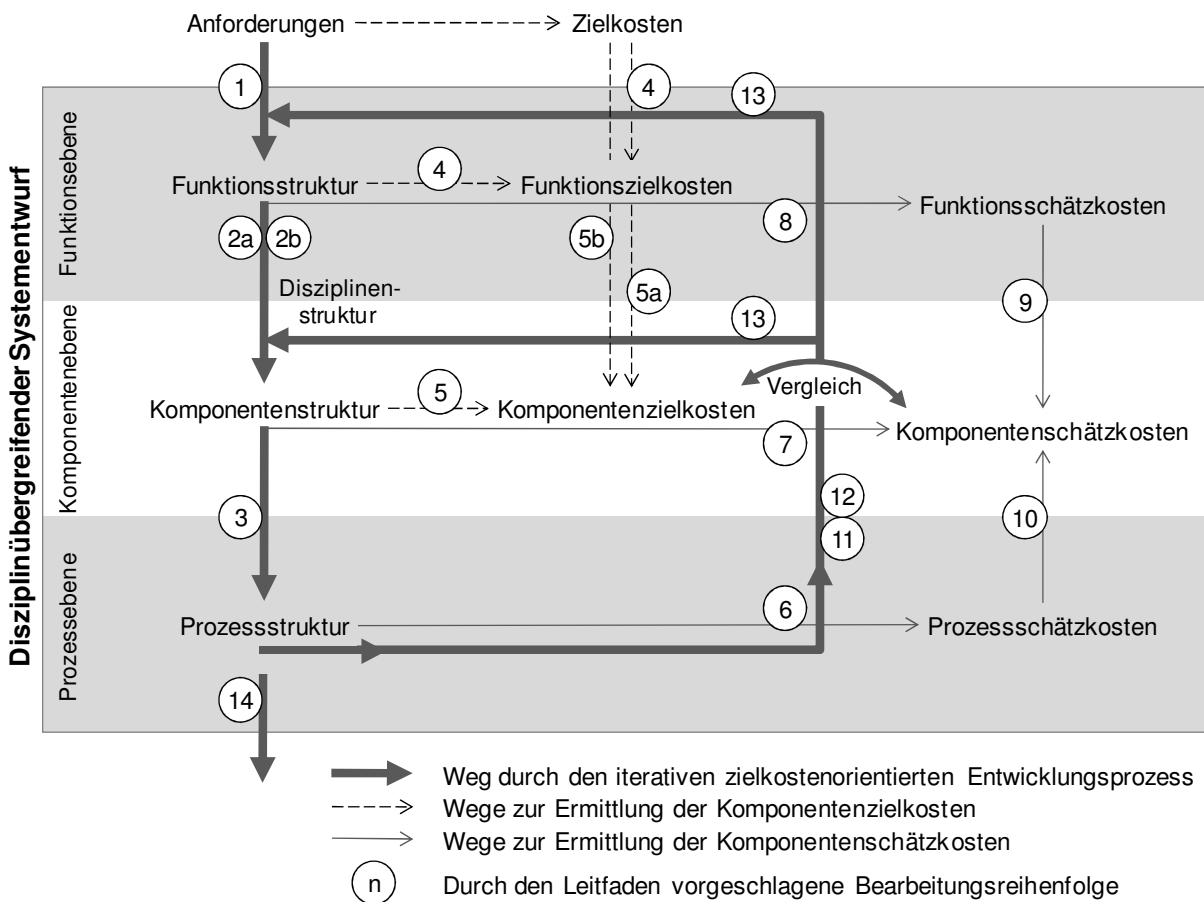


Bild 9-1: Zielkostenmanagement-Referenzprozess inklusive der Nummerierung der umseitig beschriebenen Schritte

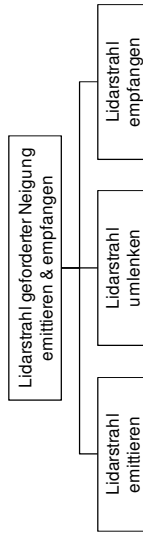
1 Aufbau der Funktionsstruktur

Vorgehen und Hilfsmittel:

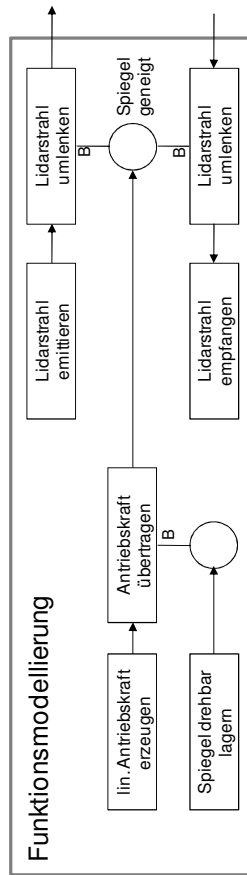
- Aufbau einer Funktionshierarchie.
- Verknüpfung und Konkretisierung der Teilfunktionen beispielsweise mit Hilfe eines *Umsatzorientierten Funktionsmodells* [LINDEMANN 2009, S. 119f], Möglichkeit der Variantenbildung.
- Konkretisierung der Funktionshierarchie.

Beispiel:

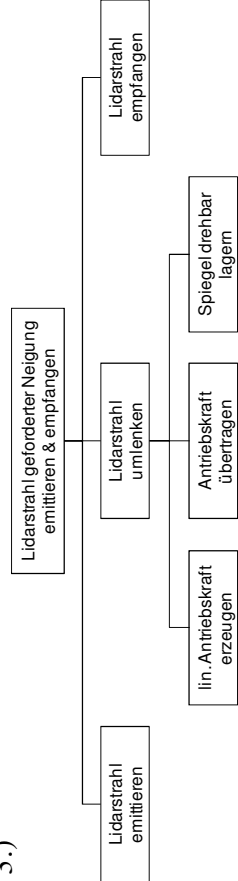
1.)



2.)



3.)



Modellbildung:

- Design Structure Matrix der Funktionsstruktur $DSM_{(F)}$:

DSM _(F)	Funktionen					
Lidarstrahl emittieren	0	0	1	0	0	0
Lidarstrahl empfangen	0	0	0	0	0	0
Lidarstrahl umlenken	0	1	0	0	0	0
lin. Antriebskraft erzeugen	0	0	0	0	1	0
Antriebskraft übertragen	0	0	1	0	0	0
Spiegel drehbar lagern	0	0	0	0	1	0

2b Berechnung der funktionalen Komponentenstruktur

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Grundlegende Partitionierung auf Basis des Umsatzorientierten Funktionsmodells (*Regeln, Handlungshilfen und Strategien für die Partitionierung* [JANSEN 2006]).
- Auswahl und Kombination geeigneter Wirkprinzipien (*Sammlung physikalischer Effekte* [PONN & LINDEMANN 2008, S. 305^{FF}]).
- Zuordnung von Komponenten zu den Teilfunktionen des Funktionsmodells.
- Berechnung der funktionalen Komponentenstruktur aus der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten.
- *Formel zur Berechnung der funktionalen Komponentenstruktur aus der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten* [MAURER 2007, S. 113^{FF}]:

$$DSM_{K(F)} = DMM_{F,K}^T \cdot DMM_{F,K}$$

Modellbildung:

- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Funktionen und Komponenten $DMM_{F,K}$
- Design Structure Matrix der funktionalen Funktionsstruktur $DSM_{K(F)}$

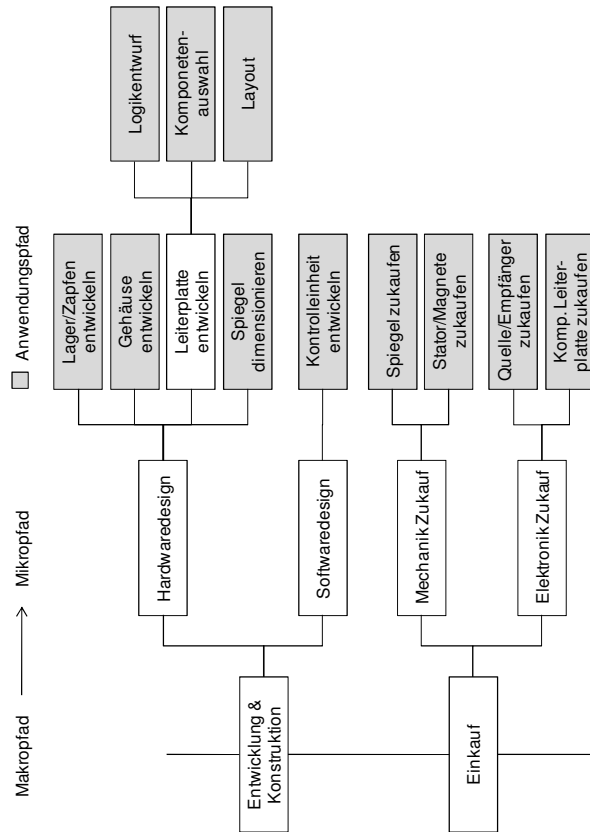
Funktionen	Komponenten													DSM _{K(F)}			
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Leiterplatte	Gehäuse				
Lidarstrahl emittieren	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
Lidarstrahl empfangen	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
Lidarstrahl umlenken	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
lin. Antriebskraft erzeugen	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	
Antriebskraft übertragen	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Spiegel drehbar lagern	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
Quelle	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Empfänger	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Kontrolleinheit	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	0	0	0
Spiegel	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager r	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Zapfen r	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Lager l	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Zapfen l	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Magnet v	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Magnet h	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
Leiterplatte	1	1	3	0	1	1	1	1	0	1	1	4	2	0	0	0	0
Gehäuse	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0

3 Entwicklung der Prozessstruktur

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Identifikation der durch die Erstellung des betrachteten Produktes betroffenen Unternehmensbereiche oder -funktionen (Makropfad / Pfadmodell der Pfadkostenrechnung [GAHR 2006, S. 87]).
- Konkretisierung des Makropfades in horizontaler Richtung (Mikropfad bis hin zum Anwendungspfad).
- Dabei: Rückgriff auf Prozessbausteine oder ganze Pfadmodule vorangegangener Entwicklungen.
- Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten.

Beispiel:



Modellbildung:

- Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten DMM_{k-p} .

Komponenten	Lager/Zapfen entwickeln	Gehäuse entwickeln	Logikentwurf	Komponentenauswahl	Layout	Spiegel dimensionieren	Kontroll-einheit entwickeln	Spiegel zukaufen	Stator/Magnete zukaufen	Quelle/Empfänger zukaufen	Komponenten Leiterplatte zukaufen	Lager/Zapfen fertigen	Leiterplatte fräsen	Leiterplatte bestücken	Leiterplatte verdrahten	Gehäuse fertigen	Kontroll-einheit implementieren	Systemintegration	Kontroll-einheit testen
Quelle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Empfänger	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Kontroll-einheit	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
Spiegel	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Lager r	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Zapfen r	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Lager l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Zapfen l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Magnet v	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Magnet h	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Leiterplatte	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1
Gehäuse	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0

4 Ermittlung der Funktionszielkosten

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Gewichtung der Teilfunktionen gemäß ihrer Kundenrelevanz.
- Multiplikation der Prozentwerte mit den Gesamtzielkosten.
- Integration der Funktionszielkosten in das Informationsmodell.
- *Formel zur Berechnung der Funktionszielkosten:*

$$\vec{f}_z = \vec{f}_g \cdot GZK$$

Beispiel:

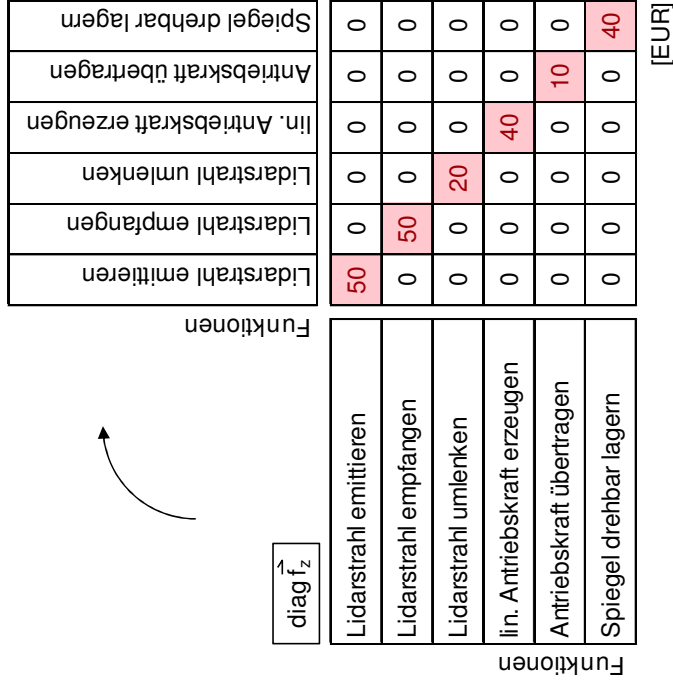
Lidarstrahl emittieren	24%
Lidarstrahl empfangen	24%
Lidarstrahl umlenken	9%
lin. Antriebskraft erzeugen	19%
Antriebskraft übertragen	5%
Spiegel drehbar lagern	19%

Gesamtzielkosten GZK: 210 EUR

$$\vec{f}_g = \begin{pmatrix} 0,24 \\ 0,24 \\ 0,09 \\ 0,19 \\ 0,05 \\ 0,19 \end{pmatrix}$$

Modellbildung:

- Modellierung der Funktionszielkosten als Diagonalmatrix $\text{diag} \vec{f}_z$.



5b Bestimmung der Komponentenzielkosten ohne Funktionszielkosten

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Gewichtung der Komponenten gemäß ihrer Kundenrelevanz bzw. ihrer Bedeutung für die Erfüllung der Gesamtfunktion.
- Multiplikation der Prozentwerte mit den Gesamtzielkosten.
- Integration der Komponentenzielkosten in das Informationsmodell.

• *Formel zur Berechnung der Komponentenzielkosten:*

$$\vec{k}_z = \vec{k}_g \cdot GZK$$

Beispiel:

Quelle	6%	0,06
Empfänger	6%	0,06
Kontrolleinheit	17%	0,17
Spiegel	9%	0,09
Lager r	4%	0,04
Zapfen r	4%	0,04
Lager l	4%	0,04
Zapfen l	4%	0,04
Stator	5%	0,05
Magnet v	5%	0,05
Magnet h	5%	0,05
Leiterplatte	20%	0,20
Gehäuse	12%	0,12

$$\vec{k}_g =$$

0,06
0,06
0,17
0,09
0,04
0,04
0,04
0,04
0,05
0,05
0,05
0,20
0,12

Gesamtzielkosten GZK: 210 EUR

Modellbildung:

- Modellierung der Komponentenzielkosten als Diagonalmatrix $\text{diag } \vec{k}_z$

	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Leiterplatte	Gehäuse
Quelle	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Empfänger	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kontrolleinheit	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spiegel	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lager r	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Zapfen r	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
Lager l	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
Zapfen l	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
Magnet v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
Magnet h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
Leiterplatte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43	0
Gehäuse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25

[EUR]

6 Prozesskostenschätzen

Vorgehen und Hilfsmittel:

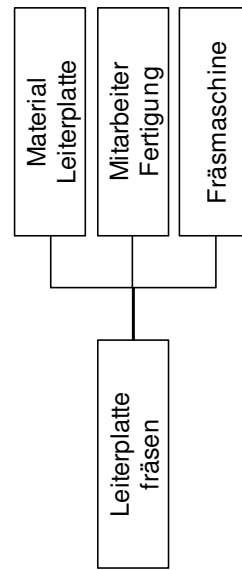
- Zuordnung von Ressourcen zu den Prozessschritten
- Kostensätze der Ressourcen ermitteln.
- Ressourcenverbrauch schätzen (*Aktivitätsorientierte Kurzkalkulation mittels Regression – Anhang 9.4*).
- Multiplikation der Kostensätze mit den Ressourcenverbräuchen.
- Integration der geschätzten Prozesskosten in das Informationsmodell.

- *Formel zur Berechnung der Prozessschätzkosten:*

$$\vec{p}_s = DMM_{P-RS} \cdot \vec{r}$$

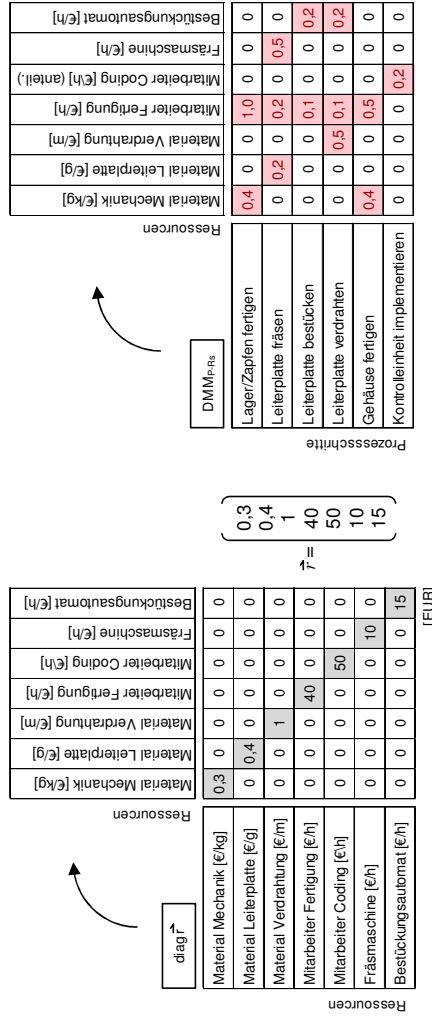
Anmerkung: Eine sinnvolle Schätzung kann nur erfolgen, wenn auf Daten von Vorgängerprodukten zurückgegriffen werden kann!

Beispiel:



Modellbildung:

- Modellierung der Kostensätze als Diagonalmatrix $diag \vec{r}$.
- Quantifizierte Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Prozessschritten und Ressourcen DMM_{P-RS} .
- Modellierung der Prozesskosten als Diagonalmatrix $diag \vec{p}_s$.



reduziertes Beispiel

7 Komponentenkosten schätzen

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Kosten der einzelnen Komponenten schätzen (*Kurzkalkulation über eine leistungsbestimmende Größe, ergebnisorientierte Kurzkalkulation mittels Regression, ergebnisorientierte Kurzkalkulation mittels Such-/Ähnlichkeitskalkulation – Anhang 9.4*).

Anmerkung: Eine sinnvolle Schätzung kann nur erfolgen, wenn auf Daten von Vorgängerprodukten zurückgegriffen werden kann!

Beispiel:

- Kalkulation der Elektrohafmagnete mit Hilfe der *ergebnisorientierten Kurzkalkulation mittels Regression* unter Berücksichtigung der zwei kosten treibenden Parameter *Hafkraft* und *Haffläche*.

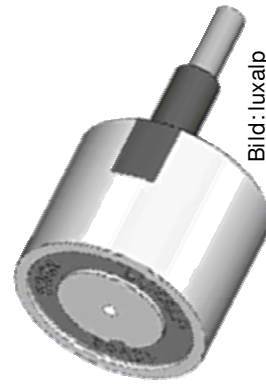


Bild: luxalp

Modellbildung:

- Modellierung der Komponentenschätzkosten als Diagonalmatrix $\text{diag } k_s$.



$\text{diag } k_s$

Komponenten	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Lager r	Spiegel	Kontrolleinheit	Empfänger	Quelle	Komponenten
Quelle	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	Quelle
Empfänger	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	Empfänger
Kontrolleinheit	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	Kontrolleinheit
Spiegel	0	0	0	15	0	0	0	0	0	15	0	0	0	Spiegel
Lager r	0	0	0	0	15	0	0	0	15	0	0	0	0	Lager r
Zapfen r	0	0	0	0	0	15	0	0	0	15	0	0	0	Zapfen r
Lager l	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	15	0	0	Lager l
Zapfen l	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	15	0	Zapfen l
Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	Stator
Magnet v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	Magnet v
Magnet h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	Magnet h
Leiterplatte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Leiterplatte
Gehäuse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Gehäuse

[EUR]

8 Funktionskosten schätzen

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Kosten der einzelnen Teilfunktionen schätzen (*Funktionsorientierte Kurzkalkulation mittels Function Costing – Anhang 9.4*).

Anmerkung: Eine sinnvolle Schätzung kann nur erfolgen, wenn auf Daten von Vorgängerprodukten zurückgegriffen werden kann!

Beispiel:

- Die Teilfunktion *Antriebskraft übertragen* wird als aufwandsarm zu realisierende Standardfunktion eingestuft und verursacht deshalb potenziell die geringsten Kosten.

Modellbildung:

- Modellierung der Funktionsschätzkosten als Diagonalmatrix $\vec{diag} f_s$.

Lidarstrahl emittieren	Lidarstrahl emittieren	51	0	0	0	0	0	0	0
Lidarstrahl empfangen	Lidarstrahl empfangen	0	51	0	0	0	0	0	0
Lidarstrahl umlenken	Lidarstrahl umlenken	0	0	15	0	0	0	0	0
lin. Antriebskraft erzeugen	Lidarstrahl empfangen	0	0	0	44	0	0	0	0
Antriebskraft übertragen	Lidarstrahl empfangen	0	0	0	0	8	0	0	0
Spiegel drehbar lagern	Lidarstrahl emittieren	0	0	0	0	0	0	68	0

[EUR]

9 Funktionsschätzkosten in Komponentenschätzkosten umrechnen

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Rückgriff auf die Gewichtung der Komponenten bezüglich ihres Beitrags zur Erfüllung der Teilfunktionen (aus **5ab**).
- Multiplikation der Gewichtungen mit den Funktionsschätzkosten.
- *Formel zur Berechnung der Komponentenschätzkosten aus den Funktionsschätzkosten* [vgl. BRAUN ET AL. 2008]:

$$DSM_{K(F)s} = DMM_{F-Kg}^T \cdot (diag \vec{f}_s \cdot DMM_{F-Kg})$$

Modellbildung:

- Gewichtete Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Teilfunktionen und Komponenten DMM_{F-Kg} (aus **5ab**).
- Quantifizierte Design Structure Matrix $DSM_{K(F)s}$ mit den Komponentenschätzkosten als Zeilensumme der unten abgebildeten Matrix.

	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h	Leiterplatte	Gehäuse	
Quelle	3,2	0	3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	3,2	3,2	13
Empfänger	0	3,2	3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	3,2	3,2	13
Kontrolleinheit	3,2	3,2	9,1	0	0	0	0	0	0	2,8	2,8	9,1	6,4	37
Spiegel	0	0	0	15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Lager r	0	0	0	0	2,7	2,7	2,7	2,7	0	0	0	2,7	0	14
Zapfen r	0	0	0	0	2,7	2,7	2,7	2,7	0	0	0	2,7	0	14
Lager l	0	0	0	0	2,7	2,7	2,7	2,7	0	0	0	2,7	0	14
Zapfen l	0	0	0	0	2,7	2,7	2,7	2,7	0	0	0	2,7	0	14
Stator	0	0	0	0	0	0	0	0	8,0	0	0	0	0	8
Magnet v	0	0	2,8	0	0	0	0	0	0	2,8	2,8	2,8	0	11
Magnet h	0	0	2,8	0	0	0	0	0	0	2,8	2,8	2,8	0	11
Leiterplatte	3,2	3,2	9,1	0	2,7	2,7	2,7	2,7	0	2,8	2,8	11,8	6,4	50
Gehäuse	3,2	3,2	6,4	0	0	0	0	0	0	0	0	6,4	6,4	26
	[EUR]													237

10 Prozessschätzkosten in Komponentenschätzkosten umrechnen

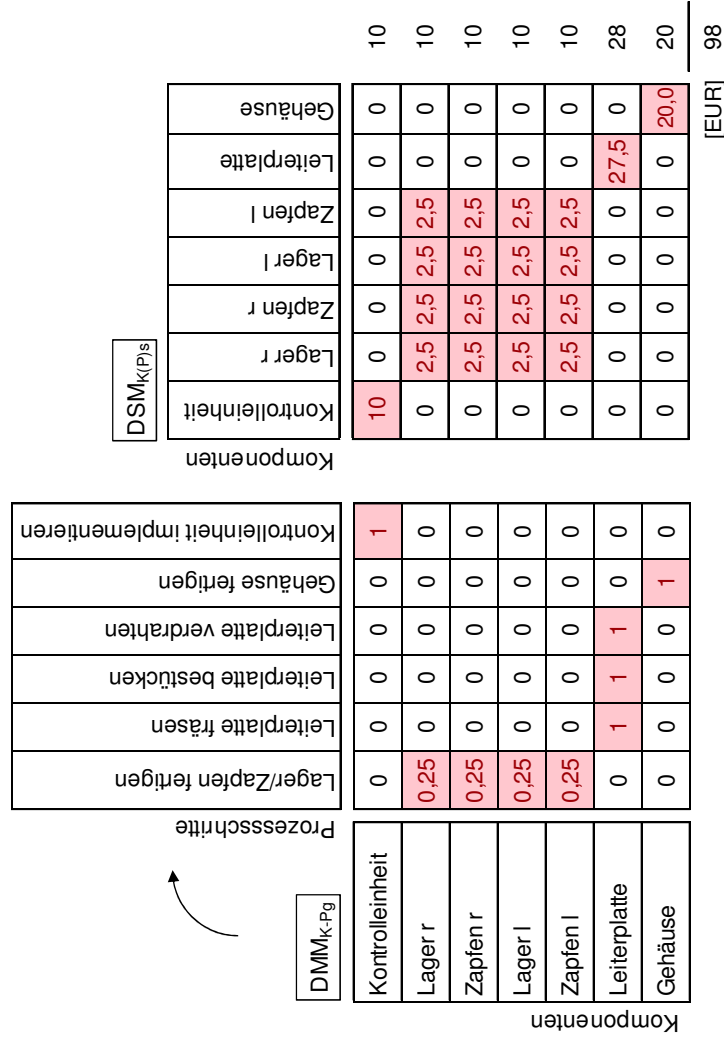
Vorgehen und Hilfsmittel:

- Gewichtung der Prozessschritte bezüglich ihres Beitrags zur Erfüllung der einzelnen Komponenten.
- Multiplikation der Gewichtungen mit den Prozessschätzkosten.
- *Formel zur Berechnung der Komponentenschätzkosten aus den Prozessschätzkosten [BRAUN ET AL. 2008]:*

$$DSM_{K(P)s} = (DMM_{K-Pg} \cdot \text{diag}(\vec{p}_s)) \cdot DMM_{K-Pg}^T$$

Modellbildung:

- Gewichtete Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten DMM_{K-Pg} .
- Quantifizierte Design Structure Matrix $DSM_{K(P)s}$ mit den Komponentenschätzkosten als Zeilensumme der unten abgebildeten Matrix.



[EUR] 98
reduziertes Beispiel

11 Optimierungsanstöße auf Basis des Vergleichs von Ziel- und Schätzkosten

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Gegenüberstellung von Ziel- und Schätzkosten.
- Der höchste Aussagegehalt wird erzielt, wenn die Zielkosten in Form der funktionalen und die Schätzkosten in Form der prozessualen Komponentenstruktur vorliegen. Dies ermöglicht den direkten Vergleich der Komponentenkosten, gibt Hinweise auf die Reduzierung von Schnittstellenkosten sowie mögliche Kosteneinsparungen durch Änderungen des Wirkprinzips oder auch einzelner Prozessschritte.

Beispiel:

- Die Schätzkosten des *Gehäuses* übersteigen die Zielkosten.
- Aus funktionaler Sicht empfiehlt sich bei der Überarbeitung eine Konzentration auf die Schnittstellen des *Gehäuses* mit der *Kontrolleinheit* und der *Leiterplatte*.
- Die *Magnete* und der *Stator* sind aus funktionaler Sicht stark verknüpft und überschreiten alle drei die Zielkosten. Aus dieser Erkenntnis heraus kann es Sinn machen zur Erfüllung der geforderten Funktionalität auf ein anderes Wirkprinzip zurück zu greifen.
- Die *Lager* und die *Zapfen* sind durch ihre gemeinsame Bearbeitung in einem Prozessschritt verknüpft. Alle vier Komponenten überschreiten die Zielkosten. Zur Kostensenkung sollte eine Überarbeitung des entsprechenden Prozessschrittes in Betracht gezogen werden.

Modellbildung:

- Quantifizierte Design Structure Matrix $DSM_{K(F)z}$ mit den Komponentenzielkosten als Zeilensumme der unten abgebildeten Matrix (aus **5ab**).
- Quantifizierte Design Structure Matrix $DSM_{K(P)s}$ mit den Komponentenschätzkosten als Zeilensumme der unten abgebildeten Matrix (aus **10**).

Komponenten	Komponenten											Zeilensumme	Komponenten				Zeilensumme					
	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Stator	Magnet v	Magnet h		Leiterplatte	Gehäuse	Magnet h	Leiterplatte		Gehäuse				
Quelle	4,6	4,6	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	3,1	3,1	13	
Empfänger	4,6	4,6	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	3,1	3,1	13	
Kontrolleinheit	0,9	0,9	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	35	2,5	8,8	6,3	35	
Spiegel	0,3	0,3	0,3	1,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	0	0	20	
Lager r	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	1,6	0	8	
Zapfen r	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	1,6	0	8	
Lager l	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	1,6	0	8	
Zapfen l	0,3	0,3	0,3	0,3	3	3	3	3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	15	0	1,6	0	8	
Stator	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,4	1,4	1,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	7	0	0	0	8	
Magnet v	0,9	0,9	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,4	2	2	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	11	0	1,6	0	8	
Magnet h	0,9	0,9	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,4	2	2	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	11	0	1,6	0	8	
Leiterplatte	0,9	0,9	2,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	3,6	0,3	0,3	0,3	0,3	43	0	1,6	0	8	
Gehäuse	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	28	0	0	0	10	
																	238	2,5	2,5	0	10	
																		2,5	2,5	0	10	
																		2,5	2,5	0	10	
																		2,5	2,5	10	6,3	43
																		3,1	3,1	6,3	6,3	25
																		3,1	3,1	6,3	6,3	25

12 Optimierungsanstöße auf Basis von Strukturcharakteristika

Vorgehen und Hilfsmittel:

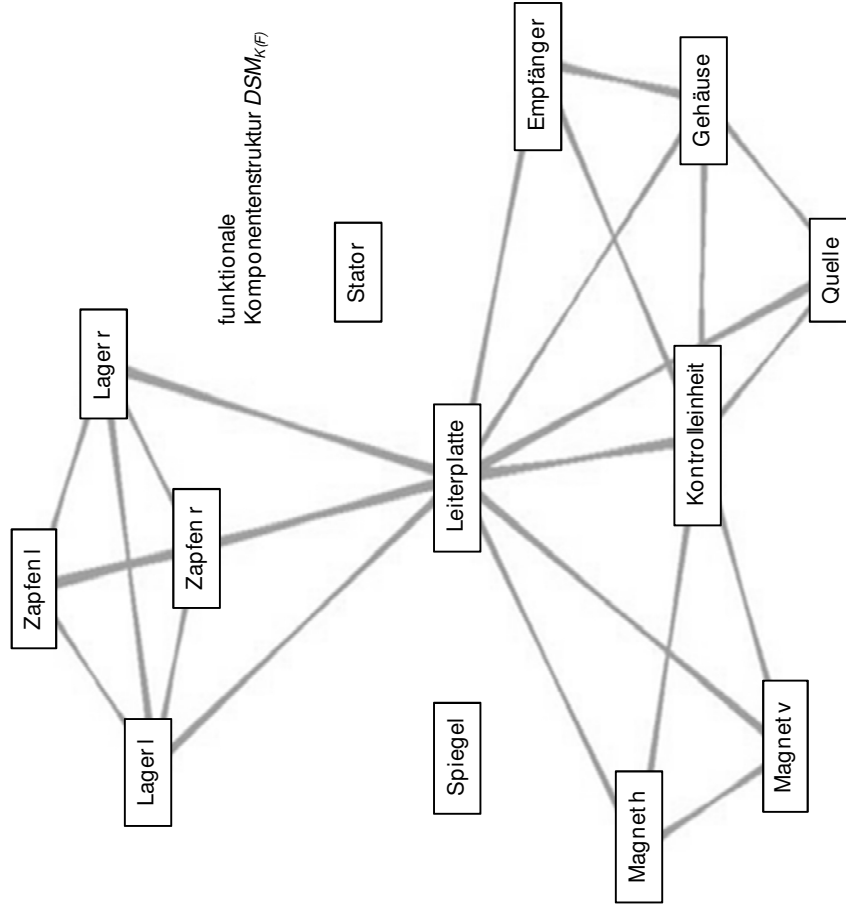
- Untersuchung der funktionalen und der physikalischen Komponentenstruktur mittels den ermittelten *kostenwirksamen Strukturcharakteristika*.

Beispiel:

- Die *Leiterplatte*, als *Gelenkknoten*, verursacht potentiell hohe Kosten.
- Für diese Annahme spricht außerdem, dass die *Leiterplatte* Mitglied der meisten *Cluster* der Struktur ist.
- Aufgrund ihrer *Vielzahl an Schnittstellen* ist auch die *Knotrolleinheit* als potentiell teure Komponente einzustufen.
- Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten ist zu erwarten, dass der *Stator* und der *Spiegel* als *isolierte Knoten* nur geringe Kosten verursachen. Allerdings ist zu beachten, dass es sich beim Spiegel um eine *optische Komponente* handelt, die laut den durchgeführten Untersuchungen oft Ausnahmen bilden.

Modellbildung:

- Graph der funktionalen Komponentenstruktur $DSM_{K(F)}$.
- Graph der physikalischen Komponentenstruktur $DSM_{K(K)}$.



13 Kostenorientierte Überarbeitung der Produktstruktur

Vorgehen und Hilfsmittel:

- Überarbeitung der physikalischen Komponentenstruktur
- Modellierung des Zusammenfassens & Erzeugens von Komponenten.
- Modellierung des Erzeugens von Relationen.
- Verrechnung der resultierenden zwei Matrizen mit der Ausgangsstruktur.

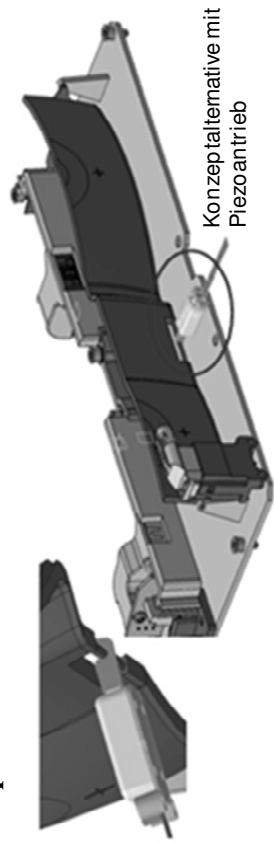
- Überarbeitung der Anbindung von Prozessschritten an Komponenten
- Modellierung des Zusammenfassens & Erzeugens von Komponenten.
 - Modellierung des Zusammenfassens & Erzeugens von Prozessschritten.
 - Modellierung des Erzeugens von Verknüpfungen zwischen Komponenten und Prozessschritten.
 - Verrechnung der resultierenden drei Matrizen mit der Ausgangsstruktur.

• *Formeln zur Berechnung der überarbeiteten Strukturen:*

$$DSM_{K(K)/2} = MAP_1^T \cdot DSM_{K(K)/1} \cdot MAP_1 + \Delta DSM_{K(K)}$$

$$DMM_{K-P/2} = MAP_1^T \cdot DMM_{K-P/1} \cdot MAP_2 + \Delta DMM_{K-P}$$

Beispiel:



Modellbildung:

- Mapping DMM_{MAP_1} zur Abbildung des Zusammenfassens und Erzeugens von Komponenten.
- $\Delta DSM_{K(K)}$ zur Abbilden des Erzeugens von Relationen.
- Überarbeitete physikalische Komponentenstruktur $DSM_{K(K)/2}$.
- Mapping DMM_{MAP_2} zur Abbildung des Zusammenfassens und Erzeugens von Prozessschritten.
- ΔDMM_{K-P} zur Abbildung des Erzeugens von Verknüpfungen zwischen Komponenten und Prozessschritten.
- Überarbeitete Domain Mapping Matrix der Verknüpfung von Komponenten und Prozessschritten $DMM_{K-P/2}$.

Komponenten		Komponenten																							
DSM _{K(K)/2}		Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Piezoantrieb	Leiterplatte	Gehäuse	Energieversorg.	Quelle	Empfänger	Kontrolleinheit	Spiegel	Lager r	Zapfen r	Lager l	Zapfen l	Piezoantrieb	Leiterplatte	Gehäuse	Energieversorg.
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1
1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0

9.3 Bewertung der Übertragbarkeit der disziplinspezifischen Methoden der Kurzkalkulation

Kurzkalkulation über eine Einflussgröße	Kurzkalkulation über Lines of Code LOC ⁴⁷			<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>										
	Kurzkalkulation über die Vererbungstiefe ⁴⁶																			
	Kurzkalkulation über die Zahl der Transistor-schaltungen ⁴⁵										<input checked="" type="checkbox"/>									
	Kurzkalkulation über die Verbindungsdichte ⁴⁴										<input checked="" type="checkbox"/>									
	Kurzkalkulation über die Platinenfläche ⁴³					<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>									
	Materialkostenmethode ⁴²	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>									
	Gewichtskosten-kalkulation ⁴¹	<input checked="" type="checkbox"/>																		
	Kurzkalkulation über eine leistungsbestimmende Größe ⁴⁰	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Grundsystem	Schnittstellenheit	Softwaremodule	Gehäuse	Stecker	PCB	Prozessor	Speicher	Signalumformer	Kabel	Stecker									
	ECU											Kabelstrang								

Originalveröffentlichung(en) Sinnvolle Übertragbarkeit/Ausweitung

⁴⁰ [EHRENSPIEL ET AL.2007, S. 459, 461FF]

⁴¹ [EHRENSPIEL ET AL.2007, S. 460FF]

⁴² [EHRENSPIEL ET AL.2007, S. 460FF]

⁴³ [TAYLOR 1985, S. 62FF; AXELSSON 2000; GIACCHETTI & ARANGO 2003, S. 146FF]

⁴⁴ [RAO ET AL. 1994]

⁴⁵ [DISLIS ET AL. 1995; KEATING 1995; CHRISTIE & STROOBANDT 2000; RAGAN ET AL. 2002]

⁴⁶ [PRECHELT ET AL. 2003]

⁴⁷ [NOTH & KRETZSCHMAR 1984; LEUNG & FAN 2002]

9.4 Basismethoden der transdisziplinären Kurzkalkulation

Kurzkalkulation über eine leistungsbestimmende Größe	
<p>Vorgehen der Vorbereitung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definition der primär kostenbestimmenden Einflussgröße (Merkmal) der betrachteten Komponente. • Formulierung eines mathem. Zusammenhangs zwischen den mögl. Ausprägungen des Merkmals und den resultierenden Kosten der Komponente mittels Regression. → Kurzkalkulationsformel 	<p>Vorgehen der individuellen Schätzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung der Merkmalsausprägung der aktuell zu entwickelnden Komponente. • Zur Berücksichtigung von Schätzunsicherheiten: Anwendung der Drei-Punkt Schätzung zur Abschätzung der Merkmalsausprägung. • Bestimmung der Kosten mittels der Kurzkalkulationsformel.
<p>Pro:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Individuelle Schätzungen aufwandsarm. • Leichte Nachvollziehbarkeit des Schätzergebnisses. 	<p>Contra:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausprägung der Merkmale in frühen Phasen teils ebenso schwer – und folglich ungenau – abzuschätzen wie Kosten (z. B. LOC). • Nicht bei jeder Komponentenklasse können die Kosten sinnvoll auf nur eine Einflussgröße zurückgeführt werden. Die Vernachlässigung anderer Einflussgrößen führt zu Ungenauigkeiten.
<p>Hilfsmittel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Katalog sinnvoller Einflussfaktoren einzelner Komponentenklassen. • Berücksichtigung von Unsicherheiten mittels Drei-Punkt Schätzung. 	
<p>Weiterführende Literatur:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurzkalkulation über eine leistungsbestimmende Größe: EHRENSPIEL ET AL. 2007, S. 461F, 475FF • Drei-PunktSchätzung: NEFF 2002, S. 79FF; GAHR 2006, S. 99 	

Ergebnisorientierte Kurzkalkulation mittels Regression	
<p>Vorgehen der Vorbereitung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definition der primär kosten-bestimmenden Einflussgrößen (Merkmale) der betrachteten Komponente. • Formulierung eines mathem. Zusammenhangs zwischen den mögl. Ausprägungen der Merkmale und den resultierenden Kosten der Komponente mittels Regression bzw. Optimierungsrechnung. → Kurzkalkulationsformel (additiv bzw. multiplikativ) 	<p>Vorgehen der individuellen Schätzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung der Merkmalsausprägungen der aktuell zu entwickelnden Komponente. • Zur Berücksichtigung von Schätzunsicherheiten: Anwendung der Drei-Punkt Schätzung zur Abschätzung der Merkmalsausprägungen. • Bestimmung der Kosten mittels der Kurzkalkulationsformel.
<p>Pro:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Individuelle Schätzungen relativ aufwandsarm. • Belastbarere Ergebnisse als bei der Berücksichtigung nur einer Einflussgröße. • Nachvollziehbarkeit des Schätzergebnisses grundsätzlich gegeben. 	<p>Contra:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufwändige Vorbereitung der Kurzkalkulationsformel. • Ausprägung der Merkmale in frühen Phasen teils ebenso schwer – und folglich ungenau – abzuschätzen wie Kosten. • Nicht bei jeder Komponentenklasse können die Kosten sinnvoll auf wenige Einflussgrößen zurückgeführt werden. Die Vernachlässigung weiterer Einflussgrößen führt zu Ungenauigkeiten.
<p>Hilfsmittel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Katalog sinnvoller Einflussfaktoren einzelner Komponentenklassen. • Berücksichtigung von Unsicherheiten mittels Drei-Punkt Schätzung. 	
<p>Weiterführende Literatur:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ergebnisorientierte Kurzkalkulation: EHRENSPIEL ET AL. 2007, S. 462FF, 475FF • Drei-PunktSchätzung: NEFF 2002, S. 79FF; GAHR 2006, S. 99 	

Funktionsorientierte Kurzkalkulation mittels Function Costing

Vorgehen der Vorbereitung:

- Definition der primär kostenbestimmenden Einflussgröße (Merkmal) der zu realisierenden Funktion.
- Definition weiterer zu berücksichtigender Merkmale.
- Sammlung unterschiedlicher Wirkprinzipien zur Erfüllung der Funktion.
- Formulierung eines mathem. Zusammenhangs zwischen den mögl. Ausprägungen des Primärmerkmals (unter Berücksichtigung der weiteren Merkmale) und den resultierenden Kosten der Funktion mittels Regression bzw. Optimierungsrechnung.
- Darstellung der resultierenden Kurven der unterschiedl. Wirkprinzipien in einem Diagramm.

Vorgehen der individuellen Schätzung:

- Abschätzung der Ausprägung des primär kostentreibenden Merkmals der aktuell zu realisierenden Funktion.
- Zur Berücksichtigung von Schätzunsicherheiten: Anwendung der Drei-Punkt Schätzung zur Abschätzung der Merkmalsausprägung.
- Abschätzung der weiteren Merkmalsausprägungen.
- Ablesen der Kosten unterschiedlicher Wirkprinzipien auf der durch die weiteren Merkmale bestimmten Kurve im zuvor erstellten Diagramm.

Pro:

- Individuelle Schätzungen relativ aufwandsarm.
- Belastbarere Ergebnisse als bei der Berücksichtigung nur einer Einflussgröße.
- Nachvollziehbarkeit des Schätzergebnisses grundsätzlich gegeben.
- Anstöße zur Konzeptoptimierung durch Berücksichtigung unterschiedlicher Wirkprinzipien.

Contra:

- Sehr aufwändige Vorbereitung der Diagramme.
- Ausprägung der Merkmale in frühen Phasen teils ebenso schwer – und folglich ungenau – abzuschätzen wie Kosten.
- Nicht bei jeder Komponentenklasse können die Kosten sinnvoll auf eine primäre Einflussgrößen zurückgeführt werden.
- Die Zahl der berücksichtigten weiteren Einflussgrößen ist aus Gründen der Übersichtlichkeit begrenzt.

Hilfsmittel:

- Berücksichtigung von Unsicherheiten mittels Drei-Punkt Schätzung.

Weiterführende Literatur:

- Function Costing: LI ET AL. 1993
- Drei-Punkt Schätzung: NEFF 2002, S. 79FF; GAHR 2006, S. 99

Ergebnisorientierte Kurzkalkulation mittels Such-/Ähnlichkeitskalkulation

Vorgehen der Vorbereitung:

- Unternehmensweite Zusammenstellung unterschiedlicher historischer Varianten einer Komponente.
- Definition der Vergleichsmerkmale (entspr. kostenbestimmenden Einflussgrößen).
- Dokumentation der Ausprägungen der Vergleichsmerkmale bei den unterschiedlichen Varianten einer Komponente sowie der dazu gehörigen Kosten.

Vorgehen der individuellen Schätzung:

- Abschätzung der Ausprägung der Vergleichsmerkmale bei der zu entwickelnden Komponente.
- Suche nach ähnlichen Varianten derselben Komponente.
- Berechnung der Kosten der zu entw. Komponente über die proportionale Abweichungen zu den ähnlichen Varianten.

Pro:

- Automatisierte Suche ermöglicht rel. aufwandsarme individuelle Schätzung.
- Gute Nachvollziehbarkeit des Schätzergebnisses.
- (→) Gute Aussagequalität.

Contra:

- Aufwändige Vorbereitung der zu durchsuchenden Daten.
- Aufwändige Datenhaltung/-pflege.
- Ausprägung der Merkmale in frühen Phasen teils ebenso schwer – und folglich ungenau – abzuschätzen wie Kosten.
- Nicht bei jeder Komponentenklasse können die Kosten sinnvoll auf wenige Einflussgrößen zurückgeführt werden.
- Die Zahl der berücksichtigten Einflussgrößen ist aus Gründen der Handhabung begrenzt.
- Zusätzlicher Suchalgorithmus notwendig.

Hilfsmittel:

- Katalog sinnvoller Einflussfaktoren einzelner Komponentenklassen

Weiterführende Literatur:

- PICKEL 1989

Aktivitätsorientierte Kurzkalkulation mittels Regression

Vorgehen der Vorbereitung:

- Definition eines generischen Prozessmodells zur Produktion der betrachteten Komponente.
- Definition (und Zuordnung) der benötigten Ressourcen und evtl. gegebenen Kosten(Ressourcen)treibern (kostentreibenden Merkmale der bearbeiteten Komponente) der einzelnen im Prozessmodell berücksichtigten Produktionsschritte.
- Definition der Kostensätze jeder verbrauchten Ressource.
- Formulierung des Zusammenhangs zwischen Kosten(Ressourcen)treiber und Ressourcenverzehr entspr. Produktionsschrittes (ggf. mittels Regression) (entspr. Verbrauchsfunktion der Nomogrammen).

Vorgehen der individuellen Schätzung:

- Anpassung des generischen Prozessmodells falls notwendig.
- Für jeden Prozessschritt entweder Abschätzung der Ausprägung des Ressourcentreibers oder direkte Abschätzung des Ressourcenverzehrs.
- Bei direkter Schätzung des Ressourcenverzehrs Unterstützung durch Drei-Punkt Schätzung.
- Ggf. Berechnung des Ressourcenverzehrs über Verbrauchsfunktion.
- Berechnung der Kosten über Kostensatz.

Pro:

- Detaillierteste Betrachtung und damit höchste Aussagequalität.
- Beste Weiterverwertungsmöglichkeit /Detaillierungsmöglichkeit.

Contra:

- Aufwändige Vorbereitung.
- Aufwändige individuelle Schätzung bezogen auf eine Komponente.
- Ausprägung der Ressourcentreiber bzw. -verzehr in frühen Phasen teils ebenso schwer – und folglich ungenau – abzuschätzen wie Kosten.
- Nicht für jede Komponente kann ein sinnvolles generisches Prozessmodell erstellt werden.
- Nicht bei jedem Prozessschritt können die Kosten sinnvoll auf wenige Ressourcen zurück geführt werden.
- Zahl der berücksichtigten Ressourcentreiber pro verbrauchter Ressource aus Gründen der Übersichtlichkeit begrenzt (insb. bei graphischer Aufbereitung).

Hilfsmittel:

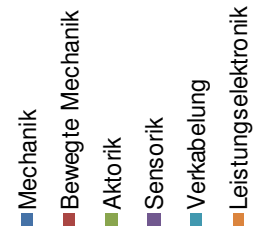
- Berücksichtigung von Unsicherheiten mittels Drei-Punkt Schätzung.

Weiterführende Literatur:

- Aktivitätsorientierte Kostenschätzung: ONG & LIM 1993; ONG 1995; GIACHETTI & ARANGO 2003; SANDBORN & MORENO 1994, MCMAHON ET AL. 1992
- Drei-PunktSchätzung: NEFF 2002, S. 79FF; GAHR 2006, S. 99

9.5 Überblick Untersuchungsbasis

Unternehmen	Investitionsgüter-industrie	A1			A2			A3			A4		
		Funktionsanzahl:	Komponentenanzahl:	Kostenbereich:	Funktionsanzahl:	Komponentenanzahl:	Kostenbereich:	Funktionsanzahl:	Komponentenanzahl:	Kostenbereich:	Funktionsanzahl:	Komponentenanzahl:	Kostenbereich:
A	Mittlere Stückzahlen	5	13	800 €	16	25	500 €	32	13	800 €	3	9	900 €
B	Anlagenbau	B1			B2								
	Geringe Stückzahlen	4	15	15 k€	9	19	7 k€						
C	Anlagenbau	C1 (Gesamtsystem)											
	Geringe Stückzahlen	22	47	91 k€									
D	Investitionsgüter-industrie	D1 (Gesamtsystem)			D2 (Gesamtsystem)								
	Mittlere Stückzahlen	11	20	300 €	11	20	400 €						



9.6 Fragebogen der Studie

PRODUKTENTWICKLUNG
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN • 85747 GARCHING

PRODUKTENTWICKLUNG
Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
Technische Universität München
85747 Garching

Hausanschrift
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Telefon +49 89 289-151 31
Telefax +49 89 289-151 44

sekr@pe.mw.tum.de
<http://www.pe.mw.tum.de>

Bearbeiter:
Dipl.-Ing. Stefanie Braun
Telefon +49 89 289-151 26
stefanie.braun@pe.mw.tum.de

Garching, 20.11.2006

Umfrage und Workshop „Kostentransparenz in der Mechatronik“

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes zum Thema „Kostentransparenz in der Mechatronik“ führt der Lehrstuhl für Produktentwicklung eine Umfrage durch. Diese richtet sich an Produktentwickler deutscher Unternehmen. Zweck der Umfrage ist es, die Grundlage für eine intensive wissenschaftliche Bearbeitung des Themas zu bereiten.

Ihre Teilnahme an der Umfrage wird belohnt – alle interessierten Teilnehmer sind eingeladen, die Ergebnisse bei einem Ergebnisworkshop an unserem Lehrstuhl zu diskutieren. Der Workshop ist für Ende April 2007 geplant.

Die Bearbeitungsdauer des Fragebogens beträgt circa 10 Minuten. Falls Sie zu einer Frage nicht antworten möchten oder können, lassen Sie diese einfach aus. Selbstverständlich werden Ihre Daten streng vertraulich behandelt und anonym ausgewertet. Aus diesem Grund ist die Befragung zweigeteilt: Wir bitten Sie zunächst Angaben zu Ihrem Unternehmen und ihrem Tätigkeitsbereich auf der Rückseite dieses Schreibens zu machen. Der eigentliche Fragebogen befindet sich auf dem beiliegenden gelben Blatt. Bitte senden Sie uns beide Teile mit dem beigelegten Rückumschlag zurück.

Für weitergehende Fragen steht Ihnen Frau Dipl.-Ing. Stefanie Braun unter 089/289-15126 gerne jederzeit zur Verfügung. Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Mit freundlichen Grüßen



Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Deutsche
Forschungsgemeinschaft
DFG

Bitte beantworten Sie folgende Fragen zu Ihrem Unternehmen. Die Beantwortung der Fragen hilft uns, einen Überblick über die Gruppe der Befragten zu erhalten.

Anmerkung: Bei jeder Multiple-Choice-Frage dieses Blattes sind Mehrfachnennungen möglich!

<p>1) Welcher Branche gehört Ihr Unternehmen an? (Falls Ihr Unternehmen mehrere Geschäftsfelder aufweist, beziehen Sie sich bitte in allen folgenden Fragen auf das Geschäftsfeld, in dem Sie derzeit tätig sind.)</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input type="checkbox"/> Automobil- und Fahrzeugindustrie <input type="checkbox"/> Luftfahrtindustrie <input type="checkbox"/> Schiffsbau <input type="checkbox"/> Medizintechnik <input type="checkbox"/> Anlagenbau </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input type="checkbox"/> Allg. Maschinenbau <input type="checkbox"/> Elektro- / Elektronikindustrie <input type="checkbox"/> Entwicklungsdienstleistungen <input type="checkbox"/> Bauindustrie <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ </td> </tr> </table>	<input type="checkbox"/> Automobil- und Fahrzeugindustrie <input type="checkbox"/> Luftfahrtindustrie <input type="checkbox"/> Schiffsbau <input type="checkbox"/> Medizintechnik <input type="checkbox"/> Anlagenbau	<input type="checkbox"/> Allg. Maschinenbau <input type="checkbox"/> Elektro- / Elektronikindustrie <input type="checkbox"/> Entwicklungsdienstleistungen <input type="checkbox"/> Bauindustrie <input type="checkbox"/> Sonstige: _____
<input type="checkbox"/> Automobil- und Fahrzeugindustrie <input type="checkbox"/> Luftfahrtindustrie <input type="checkbox"/> Schiffsbau <input type="checkbox"/> Medizintechnik <input type="checkbox"/> Anlagenbau	<input type="checkbox"/> Allg. Maschinenbau <input type="checkbox"/> Elektro- / Elektronikindustrie <input type="checkbox"/> Entwicklungsdienstleistungen <input type="checkbox"/> Bauindustrie <input type="checkbox"/> Sonstige: _____	
<p>2) Welche Stellung in der Wertschöpfungskette nimmt Ihr Unternehmen ein?</p> <input type="checkbox"/> Hersteller von Endprodukten (OEM) <input type="checkbox"/> Systemlieferant <input type="checkbox"/> Komponentenlieferant		
<p>3) In welche Kategorie würden Sie Ihr Unternehmen der Seriengröße nach einordnen?</p> <input type="checkbox"/> Einzelfertigung <input type="checkbox"/> Kleinserienfertigung (bis 20 Stück pro Monat) <input type="checkbox"/> Mittelserienfertigung (20 bis 1.000 Stück pro Monat) <input type="checkbox"/> Großserienfertigung (über 1.000 Stück pro Monat)		
<p>4) Welcher Art sind die von Ihrem Unternehmen entwickelten Güter?</p> <input type="checkbox"/> Einteilige Erzeugnisse (z. B. Zahnräder) <input type="checkbox"/> Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur (z. B. mechanische Pumpen/Getriebe) <input type="checkbox"/> Komplexe Erzeugnisse und Anlagen (z. B. elektronisch geregelte Pumpen/Getriebe)		
<p>5) Wieviele Zulieferunternehmen erbringen Leistungen für Ihr Unternehmen?</p> <p>ca. Zulieferunternehmen</p>		
<p>6) Wieviele dieser Zulieferunternehmen übernehmen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten für Ihr Unternehmen?</p> <p>ca. Zulieferunternehmen</p>		
<p>7) In welchem Bereich Ihres Unternehmens sind Sie derzeit tätig?</p> <input type="checkbox"/> Vorentwicklung <input type="checkbox"/> Produkt-/Serienentwicklung <input type="checkbox"/> Produktionsvorbereitung <input type="checkbox"/> Produktion <input type="checkbox"/> Forschungs- und Entwicklungsstrategie <input type="checkbox"/> Prozessgestaltung <input type="checkbox"/> Sonstiger Bereich: _____		
<p>8) Welcher Fachdisziplin würden Sie Ihren Tätigkeitsbereich schwerpunktmäßig zuordnen?</p> <input type="checkbox"/> Maschinenbau <input type="checkbox"/> Elektrotechnik <input type="checkbox"/> Informatik <input type="checkbox"/> Sonstige: _____		

Alle Teilnehmer der Umfrage laden wir zur Teilnahme am Ergebnisworkshop ein. Dort werden Sie über die Ergebnisse umfassend informiert und haben die Möglichkeit das Thema mit uns intensiv zu diskutieren. Der Ergebnisworkshop ist für Ende April 2007 geplant. Bitte senden Sie uns Ihren ausgefüllten Fragebogen sowie dieses Blatt im beigefügten Rückumschlag zu. Schon jetzt bedanken wir uns herzlich für die Teilnahme an unserer Umfrage!

<input type="checkbox"/> Ich habe Interesse an der Teilnahme am Ergebnisworkshop. <input type="checkbox"/> Ich habe kein Interesse an der Teilnahme am Ergebnisworkshop.

Zunächst interessiert uns, was Sie mit dem Begriff Komplexität verbinden.

1) Ein <u>komplexes Produkt</u> zeichnet sich Ihrer Meinung nach durch welche drei wesentlichen Eigenschaften aus? 1. _____ 2. _____ 3. _____
2) Ein <u>komplexer Produktentstehungsprozess</u> (Entwicklung und Umsetzung) zeichnet sich Ihrer Meinung nach durch welche drei wesentlichen Eigenschaften aus? 1. _____ 2. _____ 3. _____

Folgen Sie bei den folgenden zwei Abschätzungen Ihrer Definition von Komplexität.

3) Die Produkte meines Unternehmens werden zunehmend komplexer. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu
4) Die Prozesse der Produktentstehung werden in meinem Unternehmen zunehmend komplexer. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu

Nicht nur bei komplexen Produkten kann mit Hilfe sogenannter funktionsabsichernder Maßnahmen – wie beispielsweise Simulationen oder Hardware-in-the-Loop-Tests – frühzeitig das Zusammenspiel einzelner Entwicklungsumfänge bzw. Produktkomponenten abgesichert werden. Wie sehen Ihre Erfahrungen mit funktionsabsichernden Maßnahmen aus?

5) In unserem Unternehmen wird das Zusammenspiel einzelner Entwicklungsumfänge frühzeitig durch funktionsabsichernde Maßnahmen abgesichert.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein (weiter mit Frage 6)
Ich bin persönlich an der Vorbereitung und/oder Durchführung funktionsabsichernder Maßnahmen beteiligt.	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Der zeitliche Aufwand für die Vorbereitung und Durchführung funktionsabsichernder Maßnahmen ist heutzutage größer als noch vor einigen Jahren. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu	
Wie hoch schätzen Sie die Aufwendungen für Ausarbeitung und Durchführung funktionsabsichernder Maßnahmen ein? Beurteilen Sie in Prozent der Produkterstellungskosten (Summe aus Entwicklungs- und Produktionskosten). ca. _____% der Produkterstellungskosten	

Oft hört man, dass sich die Unternehmen aller Branchen einem wachsenden Kostendruck ausgesetzt sehen. Uns interessiert Ihre persönliche Erfahrung zum Thema Entwicklungs- und Produktionskosten.

6) Bei meinen Entwicklungstätigkeiten sehe ich mich einem hohen Kostendruck ausgesetzt. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu
7) Entwicklungs- und/oder Produktionskostenabschätzungen beeinflussen meine Arbeit (z. B. Einfluss auf Konzeptentscheidungen). stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu
8) Kosteninformationen zu den von mir verantworteten Entwicklungsumfängen sind für mich zugänglich. problemlos und ohne Einschränkung <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> überhaupt nicht
9) Die Kostenentstehung unserer Produkte ist für mich vollständig nachvollziehbar. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu
10) Welche Methoden nutzen Sie in Ihrem Unternehmen um Ihre Kostenziele zu erreichen? (z. B. ABC-Analyse, Wertanalyse, softwareunterstützte Zielkostenverfolgung etc.) _____

Bei der nächsten Frage bitten wir Sie um Ihre persönliche Einschätzung.

11) Was sind Ihrer Meinung nach drei wesentliche Kostentreiber mechatronischer Produkte? 1. _____ 2. _____ 3. _____
--

(bitte wenden)

Bitte schildern Sie uns nun Ihre Erfahrungen mit unternehmensinterner und unternehmensübergreifender Zusammenarbeit.

12) Im Rahmen meiner konstruktiven Tätigkeiten arbeite ich mit anderen Konstrukteuren / Entwicklern <u>meines Unternehmens</u> zusammen. sehr häufig <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nie
Im Rahmen dieser Zusammenarbeit muss ich mich auch mit Konstrukteuren / Entwicklern anderer Fachdisziplinen (Elektrotechniker, Softwareentwickler, ...) abstimmen. sehr häufig <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nie
13) Im Rahmen meiner konstruktiven Tätigkeiten arbeite ich mit anderen Konstrukteuren / Entwicklern von <u>Zulieferunternehmen</u> zusammen. sehr häufig <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nie
Im Rahmen dieser Zusammenarbeit muss ich mich auch mit Konstrukteuren / Entwicklern anderer Fachdisziplinen (Elektrotechniker, Softwareentwickler, ...) abstimmen. sehr häufig <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nie
14) Ich arbeite heute öfter mit Kollegen anderer Fachdisziplinen zusammen als noch vor einigen Jahren. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu
15) Die Abstimmung Ihrer Entwicklungsumfänge mit denen Ihrer Kollegen nimmt Ihrer Einschätzung nach welchen Anteil Ihrer Arbeitszeit in Anspruch? ca. _____% meiner Arbeitszeit

Eine Änderungsabhängigkeit zwischen zwei Entwicklungsumfängen besteht, wenn eine entsprechende Änderung an einem der beiden Entwicklungsumfänge eine zwangsläufige Veränderung des anderen nach sich zieht (z. B. bei Formschluss, gemeinsamer Erbringung einer Funktion oder Austausch von Information zwischen den Entwicklungsumfängen).

16) Bei den von mir verantworteten Entwicklungsumfängen bestehen Änderungsabhängigkeiten zu anderen Entwicklungsumfängen. sehr viele <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> keine
17) Die Änderungsabhängigkeiten unserer Entwicklungsumfänge sind leicht erkennbar. stimme voll und ganz zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stimme überhaupt nicht zu
18) Auswirkungen von Änderungen an den von mir verantworteten Entwicklungsumfängen auf die Kosten des Gesamtproduktes sind für mich ersichtlich. problemlos und ohne Einschränkung <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> überhaupt nicht

Eine Studie aus dem Jahr 2000 prognostizierte für die Kostenanteile der drei Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software am mechatronischen Gesamtprodukt folgende Verteilung der Entwicklungs- und Herstellkosten für das Jahr 2005:

	Entwicklungskostenanteil	Herstellkostenanteil
Mechanik	28%	39%
Elektrik/Elektronik	42%	31%
Software	30%	30%

19) Wie würden Sie diese Verteilungen in Hinblick auf die Produkte Ihres Unternehmens korrigieren?				
<u>Entwicklungskostenanteil</u>	höher	gleich	niedriger	als
Mechanik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	28%
Elektrik/Elektronik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	42%
Software	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30%
<u>Herstellkostenanteil</u>	höher	gleich	niedriger	als
Mechanik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	39%
Elektrik/Elektronik	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	31%
Software	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	30%

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

10 Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel 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 Stirnzahnradern. 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.
Zugl. München: TU, Diss. 2010
- D105 DIEHL, H.:
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer
Automobilsysteme.
Zugl. München: TU, Diss. 2009
- D106 DICK, B.:
Untersuchung und Modell zur Beschreibung des Einsatzes bildlicher Produktmodelle durch
Entwicklerteams in der Lösungssuche.
Zugl. München: TU, Diss. 2009
- D107 GAAG, A.:
Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung.
Zugl. München: TU, Diss. 2010
- D108 ZIRKLER, S.:
Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte.
Zugl. München: TU, Diss. 2010
- D109 LAUER, W.:
Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen.
Zugl. München: TU, Diss. 2010
- D110 MÜLLER, M.:
Enhancing Sport – Sports Technology Design in the Context of Sport Motive, Motion Task and Product
Feature.
TU München: 2010. (als Dissertation eingereicht)