

Eike Wintergerst

**Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation
durch Ermittlung der funktions-
bestimmenden Stellgrößen in der
Produktgenerationsentwicklung**

Guideline for deductive design variation by
determination of the relevant parameters
in product generation development

Band 86

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Forschungsberichte

Eike Wintergerst

**Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation
durch Ermittlung der funktionsbestimmenden
Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung**

Guideline for deductive design variation by
determination of the relevant parameters
in product generation development

Band 86

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2015
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktions- bestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Eike Wintergerst
geb. Sadowski
aus Filderstadt

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Juni 2015
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christian Weber

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreißsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 86

Die moderne Produktentwicklung ist gekennzeichnet von einer zunehmenden Komplexität und Kompliziertheit ihrer technischen Lösungen. Ursache hier ist der stete Trend zu einer Steigerung der Leistungsdichte und der Produktperformance, bei gleichzeitiger Senkung der Produktkosten. Wie vielfältige Untersuchungen gezeigt haben, werden in weit über 90 % aller Fälle Produkte auf der Basis von Vorgängerprodukten entwickelt. Diese Art, auf der Basis eines Referenzproduktes neue Lösungen darzustellen, fasst der Unterzeichner unter dem Begriff „Produktgenerationsentwicklung“ zusammen. Die Produktgenerationsentwicklung generiert, den Markttrends entsprechend und der Produktlebensdauer im Markt angepasst, innovative neue Produktlösungen für den Markt, um damit den Unternehmenserfolg zu sichern. Dabei kann bei einer konsequenten Umsetzung der Produktgenerationsentwicklung auf Vorgängerlösungen, Vorgängerzielsysteme und Vorgängerobjekte zurückgegriffen werden. Der Erneuerungsgrad der jeweiligen Produktgeneration ist abhängig von vielfältigen Randbedingungen. So kann ein Wandel in den Kundenbedürfnissen durch Moden und Trends, oder aber auch die Wettbewerbssituation durch Produktlösungen eines Wettbewerbers den Erneuerungsgrad definieren. Je nach Erneuerungsgrad, d. h. je nachdem wie viele Teilsysteme in welchem Umfang neu entwickelt werden müssen oder sollen, ergeben sich unterschiedliche Vorgehensweisen. In den allermeisten Fällen kann davon ausgegangen werden, dass die Grundwirkstruktur und auch die Grundwirkprinzipien nur in wenigen Fällen variiert werden. Verändert wird im Allgemeinen die Realisierung der technischen Funktion in den Gestalt-Funktions-Lösungen. Hierzu sind neue Ansätze für eine erfolgreiche und effiziente Produktentwicklung unabdingbar. Auf diesem Gebiet forscht das IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) seit vielen Jahren und hat ein Methodenkonzept unter dem Begriff „Karlsruher Schule für Produktentwicklung“ erarbeitet. In diesem Kontext ist auch die Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Eike Wintergerst angeordnet.

Für die Findung neuer technischer Lösungen gibt es zwei grundsätzliche Vorgehensweisen. Es kann durch intuitiv-assoziative Lösungssuche, unter Nutzung diverser Kreativitätsmethoden vorgegangen werden, oder eine induktiv-deduktive Vorgehensweise auf der Basis einer systematischen Funktions-Gestalt-Analyse gewählt werden. Oft werden beide Vorgehensweisen in der Praxis kombiniert. Während in der Entwicklungsmethodik eine Vielzahl von Arbeiten den intuitiv-assoziativen Weg untersucht und hier Lösungen vorschlägt, wird das induktiv-

deduktive Vorgehen nur von wenigen Wissenschaftlern betrachtet. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Eike Wintergerst an. Er entwickelt im Rahmen der Produktgenerationsentwicklung einen methodischen Ansatz zur systematischen, induktiv-deduktiven Lösungssuche auf der Basis einer qualitativen und quantitativen Modellierung multivarianter Wirkzusammenhänge und integriert diesem Methodensatz in den Konstruktionsprozess, um den Systemkonstrukteur bei der Findung innovativer Lösungen zu unterstützen. Die Arbeit ist sowohl in ihrem wissenschaftlichen Ergebnis als auch in ihrer Praxisrelevanz von höchstem Wert und wird weitere Forschungsarbeiten anregen.

Juni 2015

Albert Albers

Kurzfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich mit der Untersuchung von Methoden und Modellierungstechniken, die Systemkonstrukteure beim deduktiven Entwickeln von Gestaltungsideen unterstützen, um die Wettbewerbsfähigkeit einer neuen Produktgeneration (durch Steigerung der Leistungsfähigkeit bzw. der Qualität der Funktionserfüllung) zu verbessern.

Am Beginn der Arbeit steht eine Literaturstudie zu der Frage, wie die Eigenschaften und Funktionen technischer Systeme mit den Stellgrößen in Zusammenhang stehen, die durch Systemkonstrukteure konstruktiv beeinflusst werden können. Es wird gezeigt, dass ein kausaler (Wirk-)Zusammenhang besteht, der mit entwicklungsmethodischen Ansätzen aus unterschiedlichen Perspektiven beschrieben werden kann.

Aufbauend auf Erkenntnissen aus der Anwendung dieser Ansätze in acht empirischen Fallstudien in der Entwicklungspraxis wird anschließend diskutiert, wie gut Systemkonstrukteure dabei unterstützt werden, funktionsbestimmende Wirkzusammenhänge zu verstehen und Gestaltungsideen deduktiv zu erarbeiten: Abgesehen von einer *qualitativen* Problemfokussierung bieten die untersuchten entwicklungsmethodische Ansätze bislang kaum Unterstützung bei der *quantitativen* Analyse technischer Wirkzusammenhänge. Eine rein deduktive Gestaltvariation ist dadurch mithilfe von Entwicklungsmethoden nur schwer möglich – folglich werden oft assoziative Kreativitätstechniken zur Lösungssuche bevorzugt.

Für diese Forschungslücke werden nachfolgend zwei Modellierungstechniken eingeführt (die Einflusspfad- und Einflussmatrixanalyse, sowie die Cluster-Trend- und Cluster-Matrix-Analyse), um

- eine quantitative Charakterisierung von Wirkzusammenhängen sowie
- eine Ermittlung der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter

zu unterstützen. Sie werden in einen Leitfaden eingeordnet, mit dem exemplarisch aufgezeigt wird, wie verschiedene entwicklungsmethodische Hilfsmittel kombiniert werden können, um ein quantitatives Systemverständnis und (daraus deduktiv abgeleitete) Entwürfe zur Gestaltvariation für eine neue Produktgeneration zu entwickeln.

Abschließend werden die Erkenntnisse diskutiert, die die Erprobung der Modellierungstechniken und des vorgestellten Leitfadens in den acht empirischen Fallstudien in der Entwicklungspraxis hervorgebracht haben.

Abstract

A survey of methods and modelling techniques is presented that support engineering designers to deductively derive design ideas for improvements on the performance and on the quality of functions of a new product.

At the beginning, a literature study addresses the question how properties and functions of technical systems are related to the variables that can be influenced in engineering design. The relevant cause and effect relationships are introduced and discussed from different perspectives of engineering design methodology.

Building upon insights from applying various engineering design approaches and methods in eight empirical case studies in industry, the question is raised how good engineering designers are currently supported in their attempts to understand the relevant cause and effects relationships and to deductively derive corresponding design ideas: Apart from a qualitative modelling support, the applied methods barely provide any means for a quantitative survey of technical cause and effect relationships. A straight, deductive design variation is often restrained by methodological barriers – thus, fast and easy-to-access creativity techniques are often preferred in industrial design practice.

For this academic void concerning a quantitative analysis of technical cause and effects relationships, a set of modelling techniques are introduced (e. g. the Impact-Path- and the Impact-Matrix-Analysis as well as the Cluster-Trend- and the Cluster-Matrix-Analysis) that can be applied

- for a quantitative characterization of technical cause and effects relationships
- and to determine the most important variables for functions and properties of a product.

These methods and modelling techniques are being implemented into a new design guideline for deductive design variation. It presents, based on examples, a selection of engineering design methods that can be combined to acquire deeper, quantitative system knowledge and to understand the relevant cause and effects relationships. This may help engineering designers to deductively derive design ideas which improve the performance and on the quality of functions of a new product.

Finally, these new insights are discussed and reflected on the needs of engineering design practice as well as on the academic void that is addressed in this research.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fokus und Ziele der Arbeit	3
1.2	Struktur der Arbeit	4
2	Grundlagen und Stand der Forschung	6
2.1	Ausgewählte Charakteristika der Produktentwicklung	6
2.1.1	Problemlösen in der Produktentwicklung	7
2.1.2	Konstruieren, Gestalten und Lösen von Gestaltungsproblemen	8
2.1.3	Konstruktionsmethodik – Anspruch und Anwendungsbarrieren	13
2.1.4	Zwischenfazit.....	15
2.2	Erfolgreiche Vorgehensweisen beim Konstruieren	17
2.2.1	Persönliche Fähigkeiten und ihre Bedeutung für das Konstruieren	17
2.2.2	Denk- und Handlungsstrategien beim Konstruieren	20
2.2.3	Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten beim Konstruieren	26
2.2.4	Zwischenfazit.....	28
2.3	Funktion und Gestalt technischer Systeme.....	30
2.3.1	Definitionen, Relationen und Perspektiven der Begriffsverwendung	30
2.3.2	Bedeutung von Funktion und Gestalt beim Konstruieren.....	37
2.3.3	Grafische Modellbildung zum Lösen von Gestaltungsproblemen.....	40
2.3.4	Zwischenfazit.....	46
2.4	Eigenschaften und Merkmale technischer Systeme	48
2.4.1	Definitionen und Perspektiven der Begriffsverwendung	49
2.4.2	Einflussbeziehungen und Ausprägungen von Produkteigenschaften	62
2.4.3	Modellbildung von Einflussbeziehungen zwischen Produkteigenschaften	65
2.4.4	Bedeutung der Eigenschaftsbeschreibung für das Konstruieren	68
2.4.5	Zwischenfazit.....	70
2.5	Methoden und Modelle zur Analyse technischer Wirkzusammenhänge	72
2.5.1	Spezifikation von Anwendungs- und Testfällen	73
2.5.2	Ermittlung und Bewertung relevanter Einflussbeziehungen.....	75
2.5.3	Statistische Verfahren zur Analyse von Wirkzusammenhängen.....	80
2.5.4	Vorhersage und Erprobung von Funktions- und Zustandseigenschaften.....	86
2.5.5	Zwischenfazit.....	90
2.6	Schlussfolgerungen zum Stand der Forschung	91
3	Forschungsprofil der Arbeit	97
3.1	Forschungsbedarf und Ziele der Arbeit.....	97
3.2	Forschungshypothesen	99
3.3	Forschungsfragen.....	100

3.4	Forschungsmethoden	101
4	Beobachtungen aus empirischen Fallstudien in der Entwicklungspraxis	104
4.1	Charakteristika der empirischen Fallstudien.....	104
4.1.1	Konstellationen und Motivationen der Beteiligten.....	105
4.1.2	Ausgangssituationen und Zielstellungen	107
4.1.3	Beobachtungen zu technischen und methodischen Herausforderungen.....	111
4.2	Methodische Barrieren einer induktiv-deduktiven Vorgehenssystematik.....	115
4.2.1	Die Funktionsbarriere	116
4.2.2	Die Beobachtungsbarriere	118
4.2.3	Die Induktionsbarriere.....	120
4.2.4	Zwischenfazit	123
4.3	Reflexion der Erkenntnisse aus Theorie und Praxis	124
4.3.1	Erkenntnisse aus den empirischen Fallstudien	124
4.3.2	Bewertung der in der Literatur beschriebenen Methoden	127
4.3.3	Potenziale einer induktiv-deduktiven Vorgehenssystematik	130
5	Deduktive Gestaltvariation beim Konstruieren	132
5.1	Systematik einer induktiv-deduktiven Gestaltvariation	133
5.1.1	Funktionale Zielgrößen formulieren und strukturieren.....	137
5.1.2	Funktionsrelevante Einflussgrößen ermitteln	138
5.1.3	Hypothesen über Wirkzusammenhänge bilden.....	140
5.1.4	Funktionsbestimmende Stellgrößen ermitteln	142
5.1.5	Gestaltungsideen deduktiv ableiten und verifizieren	144
5.1.6	Zwischenfazit	146
5.2	Qualitative Modellierung funktionsrelevanter Ziel- und Einflussgrößen	148
5.2.1	Funktionsstrukturen zur Verknüpfung funktionaler Zielgrößen.....	148
5.2.2	Ursache-Wirkung-Diagramme zur Ermittlung von Einflussgrößen.....	149
5.2.3	Contact and Channel Modelle zur Verknüpfung von Funktion und Gestalt	151
5.2.4	CPM-Modell zur Visualisierung von Eigenschaftsbeziehungen	154
5.2.5	Zwischenfazit	157
5.3	Quantifizierte Modellierung und Analyse von Wirkzusammenhängen	158
5.3.1	Einflusspfadanalyse	159
5.3.2	Cluster-Trend-Analyse.....	165
5.3.3	Einflussmatrix- und Cluster-Matrix-Analyse.....	170
5.3.4	Zwischenfazit	180
5.4	Deduktive Synthese von Gestaltungsideen.....	181
5.4.1	Fallstudie I: Rückensteifigkeit einer Antriebskette verbessern	182
5.4.2	Fallstudie III: Einschraubzeit einer Blechbohrschraube verbessern.....	185
5.4.3	Fallstudie VI: Sicht aus dem Cockpit auf die Straße verbessern	186
6	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse.....	188
6.1	Erkenntnisse aus der Anwendung in der Entwicklungspraxis	188
6.1.1	Bezug zu den Barrieren der induktiv-deduktiven Funktionsanalyse.....	189
6.1.2	Bewertung der Modellierungstechniken durch die Anwender	194

6.1.3	Zweck und Anwendungsgrenzen der Modellbildung.....	198
6.2	Reflexion der Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext	200
6.3	Nutzen der Arbeit für die Forschung und Entwicklungspraxis	205
7	Zusammenfassung und Ausblick	209
7.1	Zusammenfassung	209
7.2	Ausblick	211
	Literaturverzeichnis.....	214
	Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten	224
	Anhang 1: Auswahl von Methoden und Modellierungstechniken.....	226

1 Einleitung

Die Wettbewerbssituation und veränderliche Kundenwünsche erfordern eine ständige Erneuerung und Weiterentwicklung der Produkte eines Unternehmens. Dies kann sowohl im Zuge einer Erweiterung des Produktportfolios, z. B. durch die Entwicklung eines technisch völlig neuartigen Produkts, als auch (in der überwiegenden Anzahl der Fälle) im Kontext der Produktgenerationsentwicklung¹ erfolgen.

Aus der Perspektive von Kunden und Wettbewerbern ergeben sich die technischen Differenzierungsmerkmale eines Produkts aus einer gesteigerten Leistungsfähigkeit bzw. Qualität der Funktionserfüllung, oder auch aus einem erweiterten Umfang von Funktionen und Eigenschaften.

Aus Sicht eines Unternehmens ist es erstrebenswert, eine möglichst ausgeprägte Wahrnehmung von Differenzierungsmerkmalen bei einer gleichzeitig möglichst geringen technischen Neuheit eines Produkts zu erreichen. Ökonomische und risikoanalytische Gründe führen daher oft zu der ergänzenden Randbedingung im Zielsystem, dass z. B. der Validierungsaufwand und Investitionen in neue Produktionsmittel möglichst gering gehalten werden sollen. In den meisten Entwicklungsprojekten werden daher bestehende Referenzprodukte² als Ausgangsbasis für die Konstruktion einer neuen Produktgeneration herangezogen.

In Projekten der Produktgenerationsentwicklung ist es oft sinnvoll, die mechanischen Lösungsprinzipien der verfügbaren Referenzprodukte aufzugreifen und weiterzuentwickeln – z. B. bei Industriegetrieben, Kupplungen, Ventilen, Antriebsketten, Dämpfer, Federn, Dichtungen etc.. Der Lösungsraum zur Verbesserung dieser Produkte ist dabei auf eine Variation der funktionsrelevanten Gestalt- und Prozessparameter reduziert. Trotz dieser Einschränkung der gestalterischen Freiheiten zeigt sich in vielen Fällen, dass auch durch einzelne gezielte Änderungen an der Produktgestalt signifikante Verbesserungen der Qualität der Funktionserfüllung möglich sind, die „zu *Alleinstellungsmerkmalen und damit Wettbewerbsvorteilen gegenüber anderen Unternehmen führen*“³ können und so die Begründung einer neuen Produktgeneration rechtfertigen.⁴

¹ vgl. Albers 2015a

² Unter einem Referenzprodukt wird in der vorliegenden Arbeit ein Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukt verstanden, von dem Lösungsprinzipien übernommen werden.

³ Wiedner 2013 S.8

⁴ Beispiele dafür werden auch in der vorliegenden Arbeit gegeben, siehe Kapitel 5.4

Die Herausforderung für Systemkonstrukteure besteht vor diesem Hintergrund darin, in einem Spannungsfeld aus technischen und ökonomischen Zielen und Randbedingungen den verbleibenden Lösungsraum kreativ zu erschließen und verbesserte Lösungen auszuarbeiten. Bei dieser komplexen und anspruchsvollen Tätigkeit führen sowohl Kreativitätstechniken als auch deduktive Vorgehenssystematiken zu erfolgreichen Lösungsvorschlägen.

Eine wesentliche Voraussetzung für ein zielgerichtetes Vorgehen bei der Produktgenerationsentwicklung ist ein ausgeprägtes Systemverständnis über die Funktionsweise des zugrunde liegenden Referenzprodukts. Bei der wissenschaftlichen Begleitung von acht Entwicklungsprojekten in der Industrie⁵ stellte der Autor der vorliegenden Arbeit jedoch fest, dass ein detailliertes Systemverständnis über die funktionsbestimmenden Wirkzusammenhänge nicht selbstverständlich vorausgesetzt werden kann. Hierbei sind weniger die grundlegenden Wirkprinzipien, sondern vielmehr die Zusammenhänge zwischen der (konstruktiv beeinflussbaren) Gestalt und der (sich daraus im Betrieb ergebenden) Qualität der Funktionserfüllung gemeint. Exemplarisch sei hierzu der Einfluss

- der Material- und Fluideigenschaften auf das tribologische Verhalten einer Leichtbau-Axialkolbenpumpe,
- der Kontur und der Materialeigenschaften von Bolzen und Laschen auf die Rückensteifigkeit von Antriebsketten,
- der Bewegungsbahn eines Sägeblatts auf die Sägeleistung einer Säbelsäge,
- der Dichte und Viskosität neuer Fluide auf das Leckageverhalten eines Ventils

genannt.

Die Gründe für diese Wissenslücken sind vielfältig. Zum Teil kommt es vor, dass weder in der Literatur zum Stand der Technik noch in der Forschung systematische Untersuchungen zu den jeweiligen Wirkzusammenhängen öffentlich verfügbar sind. Oft liegt aber auch die Entwicklung des Vorgänger- bzw. Referenzprodukts bereits mehrere Jahre zurück, sodass es vorkommen kann, dass die damaligen Konstrukteure nicht mehr befragt werden können. Als Dokumentationen liegen vorwiegend 3D-CAD-Modelle und Fertigungszeichnungen vor, in denen zwar die Gestalt, aber nicht der Zusammenhang zur Funktion des Produkts explizit dargestellt wird.⁶

Die Problemstellung für die begleiteten Systemkonstrukteure bestand daher zunächst in der Funktionsanalyse.⁷ Dabei sollte geklärt werden, welche Gestalt- und Prozessparameter einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung

⁵ siehe Kapitel 4.1

⁶ vgl. Weber 2012

⁷ siehe Kapitel 4.1.2

haben und wie sich Änderungen auf das Produktverhalten im Betrieb auswirken. Aus den Erkenntnissen sollten Entwürfe abgeleitet werden, wie die Produktgestalt (nicht das grundsätzliche Lösungsprinzip!) modifiziert werden müsste, um die Leistungsfähigkeit und die Qualität der Funktionserfüllung zu verbessern.

Im Kontext solcher Entwicklungsprojekte befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Frage, wie Systemkonstrukteure⁸ methodisch bei der Funktionsanalyse und der deduktiven Synthese durch Gestaltvariation unterstützt werden können.

1.1 Fokus und Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist zunächst zu erklären, wie die Qualität der Funktionserfüllung eines technischen Systems mit den Ausprägungen der beeinflussbaren Gestalt- und Prozessparameter in Zusammenhang steht. Davon ausgehend sollen Empfehlungen zur qualitativen und quantitativen Modellierung von Wirkzusammenhängen entwickelt werden, mit denen die funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter beim Konstruieren ermittelt und Gestaltungsideen deduktiv abgeleitet werden können.

Die Anwendungsfälle, die durch die Forschungsarbeit adressiert werden, beziehen sich vorwiegend auf Variationen der Produktgestalt im Kontext der Produktgenerationsentwicklung. Sie sind dadurch charakterisiert, dass bestehende Referenzprodukte durch korrigierende Variationen der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparametern weiterentwickelt werden, um ausgewählte Funktionen und Eigenschaften zu verbessern.

⁸ Nachfolgend wird die von ALBERS vorgeschlagene Bezeichnung „Systemkonstrukteure“ für jene Entwicklungsingenieure verwendet, deren Tätigkeitsschwerpunkt in der Synthese und dem Lösen von Konstruktionsproblemen liegt; vgl. acatech 2012 S.93.

1.2 Struktur der Arbeit

Inhaltlich ist die Arbeit wie in Abbildung 1.1 dargestellt in sieben Kapitel gegliedert:



Abbildung 1.1: Struktur der Arbeit

In **Kapitel 2** werden die wissenschaftlichen Grundlagen und der Stand der Forschung im thematischen Kontext der Forschungsarbeit erörtert. Dabei wird zunächst auf ausgewählte Charakteristika der Produktentwicklung im Allgemeinen und auf erfolgreiche Vorgehensweisen beim Konstruieren im Speziellen eingegangen. Damit soll unterstrichen werden, dass der Systemkonstrukteur als denkender und handelnder Mensch im Mittelpunkt der Produktentwicklung⁹ und damit auch im Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit steht.

Davon ausgehend werden die bestehenden konstruktionswissenschaftlichen Arbeiten zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt sowie zu Eigenschaften und Merkmalen technischer Systeme erörtert. Sie bilden die methodische und begriffliche Grundlage für die vorliegende Arbeit. Mit einer fachdisziplinübergreifenden

⁹ vgl. Albers 2011a

Rezension der etablierten Methoden und Modelle zur Analyse technischer Wirkzusammenhänge wird die Literaturstudie abgeschlossen.

In **Kapitel 3** wird das Forschungsprofil der Arbeit beschrieben. Es umfasst sowohl die Forschungsziele als auch die davon abgeleiteten Hypothesen und Forschungsfragen. Ergänzend dazu werden die Forschungsmethoden der Arbeit zusammenfassend vorgestellt und in den Kontext etablierter Forschungsmethodiken eingeordnet.

In **Kapitel 4** werden zunächst die Charakteristika der empirischen Fallstudien erläutert. Anschließend werden die Erkenntnisse aus diesen Fallstudien und der Literaturstudie (Kapitel 2) zusammengeführt, um die Forschungslücke und damit die Zielstellung der vorliegenden Arbeit zu präzisieren: Die Bereitstellung eines Leitfadens zur deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen, sowie, darin eingeschlossen, die Erweiterung des entwicklungsmethodischen Portfolios um Modellierungstechniken zur Funktionsanalyse.

In **Kapitel 5** wird eine systematische Abfolge von empirischen und theoretischen Vorgehensschritten entwickelt, die Systemkonstrukteure dabei unterstützen soll, die funktionsbestimmenden Wirkzusammenhänge der bestehenden Lösungsprinzipien eines Referenzprodukts besser zu verstehen und diejenigen Gestalt- und Prozessparameter zu ermitteln, die den größten Einfluss auf die Funktionserfüllung haben. Durch eine vergleichende Bewertung dieser Stellgrößen und eine Tragweitenanalyse zu Änderungsfolgen wird die deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen unterstützt.

In **Kapitel 6** werden die Ergebnisse der Erprobung der vorgeschlagenen Modellierungstechniken in den acht begleiteten Entwicklungsprojekten reflektiert. Dabei wird sowohl auf die wissenschaftliche Bedeutung als auch auf den operativen Nutzen der vorgeschlagenen Modellierungstechniken in der Entwicklungspraxis eingegangen.

Kapitel 7 fasst die Inhalte der Arbeit abschließend zusammen und gibt Anregungen für weiterführende Forschungsvorhaben, die an die vorgestellten Ergebnisse anknüpfen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses zweite Kapitel bildet den wissenschaftlichen Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit. Es werden die Grundlagen und bisherigen Ergebnisse der Konstruktionswissenschaft vorgestellt und vergleichend zueinander diskutiert, die von besonderer Relevanz für die vorliegende Arbeit sind. Dabei wird nicht nur das Ziel verfolgt, die Arbeit in den Kontext der Literatur einzuordnen. Aus den vorgestellten Inhalten wird auch ein Erklärungsmodell gebildet, das einen kausalen Zusammenhang zwischen den Funktionen bzw. Funktionseigenschaften und den Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften eines technischen Systems beschreibt.

2.1 Ausgewählte Charakteristika der Produktentwicklung

Die Entwicklung technischer Produkte findet heute in einem komplexen sozio-technischen Kontext statt. In den nachfolgenden Kapiteln wird lediglich ein sehr kleiner Ausschnitt der heutigen Herausforderungen der Produktentwicklung diskutiert. Tatsächlich müssen Produktentwickler mit einer sehr viel größeren Vielfalt von Zielen, Handlungsoptionen und Konflikten umgehen können:

Kunden erwarten einen bestimmten Nutzen von einem erworbenen Produkt; das Marketing erwartet einen Mehrwert, der das Kundeninteresse anspricht, die Kundenerwartungen erfüllt und Differenzierungsmerkmale zum Wettbewerb bietet; Konstrukteure zielen auf eine effiziente und zuverlässige Funktionserfüllung; Produktionstechniker streben eine schnelle, günstige und fehlerfreie Fertigung und Montage an; Unternehmer zielen auf eine attraktive Kapitalrentabilität.

Andere Personen sehen darüber hinaus vor allem die Kehrseite der Medaille: Unerwünschte und teilweise sogar schädliche Nebenwirkungen z. B. der Produktion und der Anwendung. Zu jedem Standpunkt sollen korrespondierende Anforderungen und Ziele berücksichtigt werden.

Produktentwicklung ist daher vor allem eines: Ein komplexes, multidisziplinäres Vorhaben, zu dem Personen aus unterschiedlichen Perspektiven eine Vielzahl von Zielen, Anforderungen, Randbedingungen und Lösungen beitragen.¹⁰ Die vorliegende Arbeit folgt vor diesem Hintergrund dem Grundsatz nach ALBERS, wonach der Mensch als handelnder Akteur im Mittelpunkt der Forschung zur Produktentwicklung stehen sollte.¹¹

¹⁰ vgl. Roozenburg 1995

¹¹ vgl. Albers 2011a

2.1.1 Problemlösen in der Produktentwicklung

In der Literatur wird das Konstruieren eines neuen technischen Produkts vielfach verglichen mit dem Vorgehen beim Lösen von Problemen. Konstruktionsprobleme sind allgemein durch eine Ausgangssituation (Ist-Zustand), eine angestrebte Endsituation (Soll-Zustand) und eine Transformationsbarriere zwischen diesen Zuständen charakterisiert.¹² Dieses klassische Verständnis adressiert in erster Linie den Weg der Problemlösung, wohingegen ALBERS die Abweichung von Ist-Zustand zu Soll-Zustand stärker betont.¹³ Diese Abweichung bezieht sich zum einen auf die verfügbare Zeitspanne und zum anderen auf die Erwartungen an die Ergebnisqualität, der eine Lösung gerecht werden soll. Je nach Ausprägung dieser Faktoren ergibt sich eine Not- oder eine Planungssituation,¹⁴ die die Vorgehensweise und die Wahl der Mittel zur Problemlösung beeinflusst. Während in einer Notsituation eine möglichst kurzfristig verfügbare, jedoch zunächst nicht notwendigerweise optimale Lösung gesucht wird, wird in einer Planungssituation eine Optimierung bezüglich der Qualität der Lösung angestrebt. Je nach Zielstellung sind unterschiedliche Handlungsweisen erfolgversprechend.¹⁵ Ziel von Konstruktionsmethoden ist die Unterstützung von Produktentwicklern bei der Bearbeitung von Konstruktionsproblemen.¹⁶

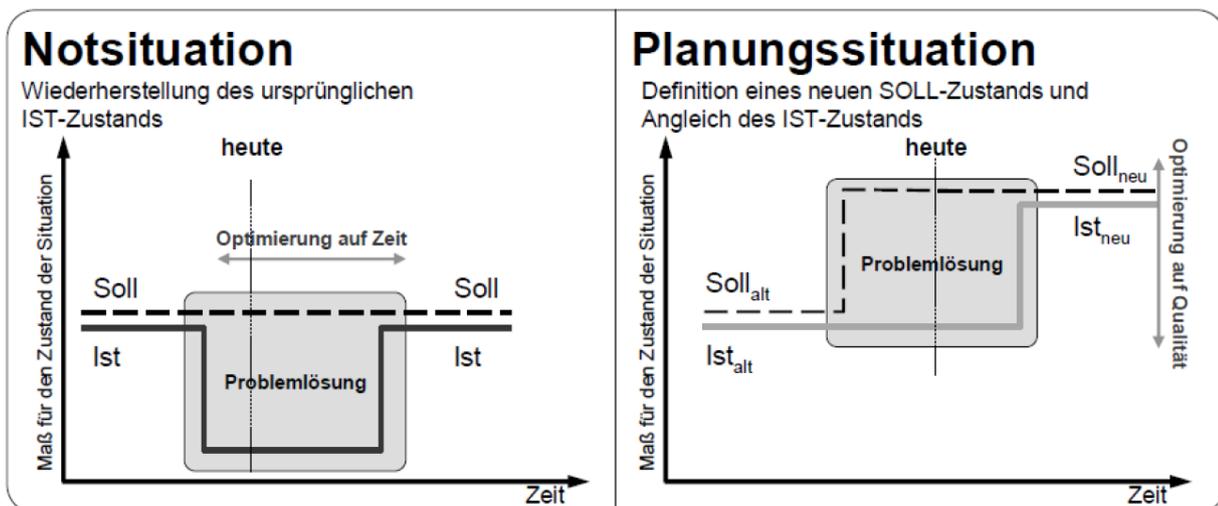


Abbildung 2.1: Not- und Planungssituation nach ALBERS¹⁴

¹² vgl. Dörner 1987; vgl. Pahl & Beitz 2005

¹³ vgl. Albers 2005

¹⁴ vgl. Albers 2006

¹⁵ vgl. Albers 2006

¹⁶ vgl. Dörner 1987

Neben individuellen, personengebundenen Einflüssen und äußeren Rahmenbedingungen sind Konstruktionsprozesse nach GÜNTHER insbesondere durch die Charakteristika des vorliegenden Konstruktionsproblems charakterisiert:¹⁷

- *Komplexität*: Konstruktionsprobleme bestehen aus mehreren Teilproblemen, die sich untereinander beeinflussen und oft nicht sequenziell, sondern meist nur parallel bearbeitet werden können.
- *Intransparenz*: Die Menge der Ziele, Anforderungen, Randbedingungen und Systemelemente, die ein Konstruktionsproblem umfasst, ist unübersichtlich und im Konstruktionsprozess nicht jederzeit vollständig bekannt. Erfahrungswerte, Annahmen und Vorhersagen müssen daher in Entscheidungen miteinbezogen werden.
- *Vielfalt*: Aus der Vielfalt relevanter Ziele, Anforderungen und Randbedingungen können sich Widersprüche für die Konstruktion ergeben, die nur durch Kompromisslösungen aufgelöst werden können.
- *Abhängigkeiten*: Beim Konstruieren müssen Wirkzusammenhänge auf verschiedenen Betrachtungsebenen berücksichtigt werden, beispielsweise zwischen Verhalten, Funktion, Gestalt, Kosten etc.

2.1.2 Konstruieren, Gestalten und Lösen von Gestaltungsproblemen

Eine typische Problemsituation beim Konstruieren ergibt sich aus der Forderung, dass eine technische Lösung erarbeitet werden soll, obwohl konkrete Anforderungen und Randbedingungen nur vage bekannt bzw. nicht vollständig vorhersehbar sind und sich zu einem wesentlichen Teil erst aus der Festlegung von Teillösungen ergeben. Dennoch soll die gesuchte Lösung technische, ökonomische, ökologische und soziale Vorgaben auch unter widersprüchlichen Bedingungen möglichst optimal erfüllen.¹⁸

Wodurch sich diese Lösung auszeichnen soll, wird häufig von „den Forderungen und Wünschen des Nutzers sowie des Marktes“ bestimmt.¹⁹ Unter der Qualität einer Lösung wird dabei „der Grad der Annäherung der Ist- an die Soll-Eigenschaften verstanden, und es sind alle Eigenschaftsarten gemeint. Es gibt also eine Qualität der Funktionserfüllung, der Sicherheit, der Ergonomie usw.“²⁰ Die Eigenschaften eines Produkts können demnach als Kriterien verstanden werden, „die ein Kunde

¹⁷ vgl. Günther 1998 S.16

¹⁸ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.1ff.

¹⁹ Ehrlenspiel 2009 S.247

²⁰ Ehrlenspiel 2009 S.247

nutzt, um die Qualität zu beurteilen“.²¹ Dieses Qualitätsverständnis lässt sich auf allen Ebenen eines Produkts und Prozesses anwenden.²² CROSBY vertritt die Auffassung, dass Qualität nicht als Erfüllung von Güte, sondern von Anforderungen definiert werden muss.²³ Der (produktbezogene²⁴) Qualitätsbegriff beschreibt demnach das Erreichen einer bestimmten Ausprägung von geforderten Funktionen und Eigenschaften innerhalb eines vorgegebenen (explizit definierten oder implizit erwarteten) Wertebereichs.

In diesem Kontext wird *Konstruieren* als das Festlegen von Funktionen und Produkteigenschaften durch eine Kombination geeigneter Lösungs- bzw. Wirkprinzipien²⁵ und das Gestalten der Wirk-Struktur eines technischen Produkts verstanden.²⁶ Dieses *Gestalten* umfasst wiederum das qualitative Entwerfen der Produktgestalt, die quantitative Dimensionierung und Tolerierung der funktionsrelevanten Wirkorte, sowie das Festlegen der funktionsrelevante Prozessparameter z. B. in der Produktion. Beim *Dimensionieren* werden die geometrischen, stofflichen und prozesstechnischen Eigenschaften der Produktgestalt abhängig von der Art der Beanspruchung und den gewählten Wirkprinzipien aufeinander abgestimmt und festgelegt.²⁷

In der Konstruktionsmethodik wird beim Konstruieren zwischen einem *generierenden* und einem *korrigierenden* Vorgehen unterschieden. Während beim korrigierenden Vorgehen lediglich die Eigenschaften und Ausprägungen von bestehenden Lösungsprinzipien verändert werden, werden bei einem generierenden Vorgehen „*durch einen Abstraktions- und nachfolgenden Konkretisierungsprozess meist mehrere völlig neue Lösungen angestrebt, aus denen ausgewählt wird.*“²⁸

Das Lösen eines *Konstruktionsproblems* umfasst somit Analyse- und Syntheseschritte zur Suche nach grundsätzlich funktionserfüllenden Lösungs- und Wirkprinzipien und zu deren Ausgestaltung. Ein *Gestaltungsproblem* liegt vor, wenn Lösungs- bzw. Wirkprinzipien bereits grob festgelegt sind, jedoch noch Vorschläge zur Einstellung der funktionsrelevanten Gestalt- und Prozessparameter gesucht werden, um den im Zielsystem definierten Anforderungen gerecht zu werden.

²¹ vgl. Köhler 2009 S.170

²² vgl. Giebel 2010 S.14f.

²³ vgl. Crosby 1986 S.69, S.72

²⁴ Garvin 1984 S.25ff. unterscheidet den absoluten, produktbezogenen, kundenbezogenen, herstellerorientierten und wertorientierten Qualitätsbegriff.

²⁵ Definitionen siehe Kapitel 2.3.1

²⁶ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51ff.

²⁷ vgl. Sperlich 1983 S.66, Ehrlenspiel 2009 S.241ff. und S.442ff.

²⁸ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.267f.

In der klassischen Konstruktionsmethodik werden vor diesem Hintergrund drei Arten von Ausgangssituationen beim Konstruieren unterschieden.²⁹ Als Kriterien zur Unterscheidung dienen der angestrebte Neuheitsgrad, die Unsicherheit bezüglich der vorherrschenden Randbedingungen und die Möglichkeit zur Verwendung bekannter Lösungsprinzipien:

- Eine *Neukonstruktion* ergibt sich aus der Verwendung neuer Lösungsprinzipien oder neuer Kombinationen bekannter Prinzipien unter veränderten Randbedingungen, wobei das Entwicklungsteam große Freiheiten bezüglich der Wahl der Mittel zur Umsetzung der Entwicklungsziele genießt.
- Eine *Anpassungskonstruktion* setzt das Vorhandensein und die Verwendung bereits bekannter und umgesetzter Lösungsprinzipien unter neuartigen Randbedingungen voraus. Das Entwicklungsziel wird also durch den Einsatz bekannter Mittel auf neue Problemstellungen erreicht. Bei komplexen Konstruktionsproblemen kann darin auch eine partielle Neukonstruktion oder eine neuartige Integration von einzelnen Teilsystemen eingeschlossen sein.
- Eine *Variantenkonstruktion* liegt vor, wenn unter vergleichbaren Randbedingungen bereits bekannte und umgesetzte Lösungsprinzipien wiederverwendet und auf das vorliegende Entwicklungsziel angepasst werden. In der Mechanik ist die Variation einzelner Parameter wie Abmessungen oder Anordnungen von Bauteilen und Baugruppen charakteristisch für eine Variantenkonstruktion. Ziel ist dabei die Erfüllung quantitativ geänderter Anforderungen bei minimalem Konstruktionsaufwand.

ALBERS beschreibt die Entwicklung moderner technischer Systeme dagegen aus der Perspektive der Produktgenerationsentwicklung: Sie ist dadurch charakterisiert, dass die Prinziplösungen zu einem großen Teil bereits bekannt sind und nicht wesentlich verändert werden. Eine pauschale Charakterisierung eines Entwicklungsvorhabens als Neu-, Anpassungs- oder Variantenkonstruktion nach der oben genannten Definition sei daher wenig sinnvoll. „*Vielmehr müssen jeweils individuell die Anteile der Konstruktionsumfänge eingeordnet werden.*“³⁰ Während in der Entwicklungspraxis nur vereinzelt ein neues *Lösungsprinzip* entwickelt werden muss, führt letztendlich eine *Gestaltvariation* bei der Mehrzahl der Teilsysteme dazu, dass neue oder veränderter Ziele, Anforderungen und Randbedingungen erfüllt werden können. Bei dieser Gestaltvariation wird ein bestehendes Lösungsprinzip eines Referenzprodukts aufgegriffen, um nachfolgend die funktionsbestimmenden Eigenschaften gezielt zu modifizieren. Das aufgegriffene Lösungsprinzip kann

²⁹ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.4; vgl. Ehrlenspiel 2009 S.261ff.

³⁰ vgl. Albers 2015a

sowohl Ergebnis einer Technologie- oder eines Vorentwicklungsprojekts sein, als auch aus Produkten abgeleitet werden, bei denen bereits ähnliche Teilfunktionen effizient realisiert wurden.

Der Anteil der Neuentwicklung von Lösungsprinzipien fällt nach ALBERS innerhalb eines Entwicklungsprojekts meist weit geringer aus, als der Anteil der Neuentwicklung durch Gestaltvariation,³¹ die im selben Maße zu innovativen (also am Markt erfolgreichen³²) Lösungen führen können. Innerhalb einer neuen Produktgeneration lassen sich demnach unterscheiden:

- *Prinzipvariationsanteile*: Die Neuentwicklung von Teilsystemen durch Adaption und Modifikation bekannter Lösungsprinzipien aus Produkten, die ähnliche Funktionen und Eigenschaften in ganz anderen Kontexten erfüllen.
- *Gestaltvariationsanteile*: Die Neuentwicklung von Teilsystemen durch Variation der Produktgestalt, wobei ein bekanntes Lösungsprinzip aus einem Referenzprodukt übernommen wird und die funktionsbestimmenden Eigenschaften so variiert werden, dass eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, der Leistungsfähigkeit und / oder der Qualität der Funktionserfüllung erreicht wird. Die Gestaltvariation ist nach ALBERS die häufigste Gestaltungsaktivität der Produktentwicklung.
- *Übernahmevariationsanteile*: Die Einbindung bestehender Lösungen in eine neue Produktgeneration, ohne dass daran – evtl. abgesehen von den Schnittstellen – konstruktive Anpassungen vorgenommen werden.³³

Bereits zu Beginn einer Produktentwicklung sind meist die Ziele, Anforderungen und Randbedingungen mit Unsicherheiten behaftet. Dennoch müssen richtungsweisende Entscheidungen getroffen werden, die das Innovationspotenzial am Markt umfangreich bestimmen. „*Es gilt das Paradox der Konstruktion: Früh kann man viel bewegen, aber man kennt die Auswirkungen kaum. Später kann man leicht beurteilen, aber kaum mehr ändern.*“³⁴ Ausgehend von der Ermittlung geeigneter Lösungsprinzipien liegt nach ALBERS die Komplexität der Produktentwicklung – und damit auch die Tragweite dieses Zitats – in der Umsetzung der Lösungsprinzipien in Produktgestalt, die den beabsichtigten Zielen, Anforderungen und Randbedingungen gerecht wird.³⁵ Die Aufgabe der Entwicklungsmethodik sei es, Methoden und Prozesse für unterschiedliche Anteile von Prinzip- und Gestalt-Neuentwicklungen zu erforschen und operativ nutzbar zu machen.

³¹ vgl. Albers 2015a

³² vgl. Schumpeter 1961 S.91

³³ vgl. Albers 2015a

³⁴ Grabowski 1997

³⁵ vgl. Albers 2015a

Auch andere Autoren weisen darauf hin, dass sich die überwiegende Mehrheit der Produktentwicklungsprojekte mit Konstruktionsformen befasst, die auf bereits bekannten Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukten beruhen.³⁶ ECKERT stellt beispielsweise fest, dass die meisten neuen Produkte durch Variationen entstehen, wobei insbesondere bei komplexen Produkten zuverlässig funktionierende Komponenten und Teilsysteme soweit wie möglich übernommen würden,³⁷ um potenzielle Risiken und erforderliche Investitionen z. B. in Produktionsmittel zu reduzieren. Der Neuheitsgrad eines Produkts definiere sich demnach ebenso maßgeblich durch eine Verbesserung der Funktionen und Eigenschaften existierender Funktionseinheiten oder durch eine Erweiterung ihres Anwendungsspektrums.³⁸

ECKERT betont am Beispiel eines Verbrennungsmotors, dass sich die grundlegenden Funktionen und Lösungsprinzipien vieler technischer Produkte augenscheinlich über mehrere Dekaden kaum verändert hätten.³⁹ Dennoch würden auch solche Produkte in neuen Generationen zu bedeutenden Innovationen weiterentwickelt. Die Drucksituation im Wettbewerb zwingt Unternehmen vermehrt dazu, weniger durch Variationen an bestehenden Lösungsprinzipien, sondern durch gezielte Modifikationen an der Produktgestalt auf veränderte Ziele und Anforderungen zu reagieren. ECKERT belegt diese Äußerungen mit Interview-Studien in der Automotive-Entwicklungspraxis,⁴⁰ aus denen hervorgeht, dass auch solche Vorhaben gravierende Herausforderungen für die Konstruktion bereithalten.

Die Herausforderung für einen Konstrukteur besteht demnach *„im Lösen von Entwicklungsproblemen, die durch konkrete Randbedingungen bereits existierender Lösungen bestimmt werden.“*⁴¹ Seine Handlungsmöglichkeiten sind nach WIEDNER meist darauf beschränkt, *„den oft sehr begrenzten Lösungsraum systematisch zu erkunden und kreativ zu nutzen. [...] Dabei können winzige, scheinbar unwichtige Details zu Alleinstellungsmerkmalen und damit Wettbewerbsvorteilen gegenüber anderen Unternehmen führen.“*⁴²

Die vorliegende Arbeit ist einer bestimmten Problemsituation beim Entwickeln einer neuen Produktgeneration gewidmet: Der Entwicklung von Ideen zur gezielten Gestaltvariation, um ausgewählte Funktionen und funktionsbestimmende Eigenschaften zu verbessern.

³⁶ vgl. Wyatt 2009, Deubzer 2009, Eckert 2010, Eckert 2011, Wiedner 2013

³⁷ vgl. Eckert 2010

³⁸ vgl. Eckert 2010

³⁹ vgl. Eckert 2013

⁴⁰ vgl. Eckert 2013

⁴¹ Thau 2013 S.8

⁴² Wiedner S.8

2.1.3 Konstruktionsmethodik – Anspruch und Anwendungsbarrieren

Die Wissenschaft der Konstruktionsmethodik befasst sich mit der Erforschung und Lehre von Konstruktionsmethoden.⁴³ Sie sammelt, entwickelt und validiert Denk- und Handlungsstrategien *„zum Konstruieren technischer Systeme, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie, aber auch aus den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben haben.“*⁴⁴ Sie bedient damit sowohl die erkenntnistheoretische Ebene der Ingenieurwissenschaften als auch die Bedarfe der Konstruktionspraxis nach Hilfestellung beim Lösen komplizierter und komplexer Konstruktionsprobleme. Die Ergebnisse werden als deskriptive oder präskriptive Theorien, Ansätze, Methoden und Modelle zusammengefasst, die in der Aus- und Weiterbildung von Konstrukteuren, im wissenschaftlichen Diskurs und zum Teil auch in der industriellen Praxis Anwendung finden.

Die Konstruktionswissenschaft verfolgt damit das Ziel, *„Zusammenhänge, Regeln, Gesetze und Systematiken zu finden, um Konstruieren verständlicher, beherrschbar, ökonomisch und lehrbar zu machen“*.⁴⁵ Konstruktionsmethoden sollen die Intuition, Erfahrung und Begabung von Konstrukteuren unterstützen, indem sie in schwierigen Situationen als ergänzende Hilfestellung *„die Leistungs- und Erfindungsfähigkeit steigern“*.⁴⁶ Dieses Ziel soll erreicht werden, indem sie *„dem Menschen im Mittelpunkt der Produktentwicklung“*⁴⁷ dabei helfen, zielgerichtet qualitativ gute Lösungen zu finden und umzusetzen.⁴⁸ Dazu sollen sie unter anderem dabei unterstützen,⁴⁹

- wichtige Arbeits- und Entscheidungsschritte zu einem leistungsfähigen Entwicklungsprozess zu verknüpfen,
- Problemsituationen und Lösungsräume umfassend und systematisch zu erschließen,
- unbewusste Erfahrung und Wissen zugänglich sowie (komplexe) technische Zusammenhänge bewusst, erkennbar und verständlich zu machen,
- Lösungsmöglichkeiten und Ergebnisse objektiviert zu beurteilen, etc.

Diesen Absichten und dem grundsätzlichen Bedarf der Konstruktionspraxis⁵⁰ gegenüber steht jedoch die Beobachtung, dass Konstruktionsmethoden *„nicht in dem*

⁴³ vgl. Eekels 2001 S.247

⁴⁴ Pahl & Beitz 2005 S.10

⁴⁵ Jänsch 2007 S.14

⁴⁶ Pahl & Beitz 2005 S.10

⁴⁷ Albers 2011a, Albers 2012a

⁴⁸ Jänsch 2007 S.19

⁴⁹ vgl. Jänsch 2007 S.16ff.

⁵⁰ vgl. Birkhofer 2005, Jänsch 2007 S.167ff.

erwarteten Umfang in der Industrie angewendet“ werden.⁵¹ Die Ursachen dafür sind vielfältig und deren Erläuterung würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen, daher werden nachfolgend nur einige für die vorliegende Arbeit besonders relevante Aspekte genannt. Für weiterführende Literatur sei exemplarisch auf die Arbeiten von BIRKHOFFER und JÄNSCH verwiesen.⁵²

Neben einer inhaltlichen Diskrepanz zwischen den von der Wissenschaft angebotenen und den von der Industrie nachgefragten und benötigten Methoden⁵³ sind nach JÄNSCH konkrete Anwendungsbarrieren für Konstruktionsmethoden in der Praxis dafür verantwortlich.⁵⁴ Typische Anwendungsbarrieren lägen vor allem im Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen in die Praxis. Dies sei zurückzuführen auf eine unzureichende Darstellung und Dokumentation von Methoden, was gewisse Akzeptanz- und Anwendungsprobleme zur Folge hätte:

Tabelle 2-1: Anwendungsbarrieren für Konstruktionsmethoden nach JÄNSCH⁵⁴

Darstellungs- und Dokumentationsprobleme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ theoretisch, hoher Abstraktionsgrad ▪ keine einheitliche Darstellung und Struktur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distanz zu praktischem Bedarf und Möglichkeiten zur Anwendung (z. B. Werkzeugunterstützung)
Akzeptanz- und Anwendungsprobleme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zu geringe Flexibilität ▪ passt nicht zur eigenen Erfahrung ▪ heterogene Begrifflichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung nicht nachgewiesen ▪ steht der künstlerischen Attraktivität des Konstruierens entgegen

Neben der Problematik der Zeitinvestition zum Erlernen neuer Vorgehensweisen liegt eine weitere wichtige Anwendungsbarriere in der in Kapitel 2.2.2 näher erläuterten menschlichen Tendenz zu opportunistischem⁵⁵ statt systematischem Denken und Handeln. „Besonders erfahrene Konstrukteure wenden nicht einfach spontan Methoden an“, stellen BIRKHOFFER und BADKE-SCHAUB fest.⁵⁶ Vielmehr kämen diese eher dann zum Einsatz, wenn eine besondere Problemsituation auftritt und opportunistisches Vorgehen nicht weiterführt. „Konstrukteure folgen dann so lange einem systematischen Ansatz, bis sie erneut in Schwierigkeiten geraten“⁵⁷ oder zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen sind. Im erstgenannten Fall sei die Gefahr groß, dass eine Methode zukünftig nicht mehr angewendet würde, weil sie in dieser Situation nicht vollständig zur Lösungsfindung beigetragen habe. Nach JÄNSCH

⁵¹ Jänsch 2007 S.46

⁵² vgl. Birkhofer 1991, Jänsch 2007

⁵³ vgl. Birkhofer 2005

⁵⁴ vgl. Jänsch 2007 S.50

⁵⁵ vgl. Hacker 2002

⁵⁶ Geis 2008

⁵⁷ vgl. Eckert 2010

könne jedoch auch der *Einstellungseffekt*⁵⁸ dazu führen, dass Methoden nicht oder falsch angewendet würden. Neben einer grundsätzlichen Abneigung gegenüber neuen, nicht selbst etablierten Vorgehensweisen zähle auch die Neigung von (insbesondere weniger erfahrenen) Konstrukteuren, eine einmal erfolgreich angewendete Methode beim nächsten Mal wieder auf dieselbe Weise – d. h. ohne Anpassungen an die möglicherweise veränderte Problemstellung – anzuwenden.

ALBERS, DENKENA und MATTHIESEN stellen in einer Studie zum Berufsbild von Konstrukteuren⁵⁹ fest, dass die eingeschränkte Anwendung von Konstruktionsmethoden in der Praxis auch auf die Ausbildungssituation an den Hochschulen zurückzuführen sei. *„Methodenkompetenz ist der Kern der Konstrukteurkompetenzen.“* Die Grundlage für Methodenkompetenz würde im Studium durch das vermittelte Methodenwissen gelegt. Dies würde jedoch nur *„selten als Lernergebnis, Mehrwert und Vorteil herausgestellt und kommuniziert.“* Neben den fachlichen Studieninhalten käme die Konstruktionsmethodik *„häufig zu kurz, zum Beispiel die Vorgehensweise beim Konstruieren“* werde meist nur theoretisch und selten in einem fächerübergreifenden Kontext behandelt. Auch JÄNSCH⁶⁰ betont die Bedeutung einer fachlich fundierten und fächerübergreifend inspirierten Kompetenz, Konstruktionsmethoden situationsgerecht anwenden zu können, als Ergebnis der Ausbildung von Systemkonstrukteuren. Dies könne jedoch nur mit anwendungsorientierten Lehrekzepten⁶¹ erreicht und daher mit Blick auf die gegenwärtige Ausbildungssituation an Universitäten nicht allgemein vorausgesetzt werden.⁶²

Für die vorliegende Arbeit liefern die vorgenannten Arbeiten zu Anwendungsbarrieren von Konstruktionsmethoden wertvolle Hinweise darüber, welche Anforderungen bei der (Weiter-)Entwicklung von Konstruktionsmethoden an deren strukturellen Aufbau, ihre inhaltliche Leistungsfähigkeit und ihre Anpassung an Fach- und Methodenkompetenzen von Systemkonstrukteuren berücksichtigt werden müssen.

2.1.4 Zwischenfazit

Charakteristisch für eine typische Ausgangssituation beim Konstruieren ist das Vorhandensein von Referenzprodukten, z. B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte in einem bestehenden Marktsegment. Der Konstruktionsaufwand, das

⁵⁸ vgl. Jänsch 2007 S.111

⁵⁹ acatech 2012 S.97f.

⁶⁰ vgl. Jänsch 2010 S.45

⁶¹ Beispiele dazu gibt ALBERS in den Lehrveranstaltungen „Maschinenkonstruktionslehre“ und „Integrierte Produktentwicklung“ am Karlsruher Institut für Technologie; vgl. Albers 2008c

⁶² vgl. Jänsch 2010 S.193

Änderungsrisiko und die erforderlichen Investitionen zur Realisierung einer Lösung können in solchen Fällen reduziert werden, indem bewährte Teillösungen und Lösungsprinzipien übernommen und weiterentwickelt werden.⁶³ ALBERS spricht in diesem Zusammenhang von einer *Produktgenerationsentwicklung*.⁶⁴

Konstruieren bedeutet demnach, technische Probleme zu lösen.⁶⁵ Der Weg zur Lösung ist meist gekennzeichnet von Intransparenz, Abhängigkeiten, Widersprüchen und Komplexität.⁶⁶ Eine wichtige Rolle spielt daher das Erfahrungswissen und das Systemverständnis von Konstrukteuren (z. B. wie vorzugehen ist und welche Stellhebel genutzt werden können), sowie ihr Einschätzungsvermögen zur Beurteilung von Änderungen und ihren Auswirkungen.⁶⁷

Ergänzend dazu stellt die Entwicklungsmethodik mit Theorien, Methoden und Modellen verschiedene Hilfsmittel bereit, die ein zielgerichtetes Konstruieren auch in schwierigen Situationen unterstützen sollen. Sie helfen Konstrukteure beispielsweise dabei, komplexe technischen Abhängigkeiten und Einflussbeziehungen besser zu verstehen. Die Anwendung und Verbreitung konstruktionswissenschaftlicher Ergebnisse in der Praxis ist jedoch aus mehreren Gründen nicht so stark ausgeprägt,⁶⁸ wie vor dem Hintergrund der geäußerten Bedarfssituation⁶⁹ anzunehmen wäre. Die Gründe dafür liegen zum einen in einer inhaltlichen Diskrepanz zwischen den von der Wissenschaft angebotenen und den von der Industrie nachgefragten Methoden,⁷⁰ zum anderen in konkreten Anwendungsbarrieren von Konstruktionsmethoden in der Praxis.⁷¹ Daraus leitet sich für die vorliegende Arbeit vor allem die Zielstellung ab, dass die erarbeiteten Ergebnisse und Empfehlungen

- auf etablierten Begrifflichkeiten aufbauen und möglichst konkret formuliert und strukturiert sein sollen,
- konkrete Bedarfs- und Problemsituationen der Wissenschaft und der Praxis adressieren sollen,
- flexibel auf individuelle Vorgehensweisen anwendbar sein sollen,
- die Aufnahme und Verarbeitung von individuellem Erfahrungswissen ebenso wie die methodische Erarbeitung neuer, weiterführender Erkenntnisse unterstützen sollen, sowie
- auf in der Praxis verbreiteten, etablierten Werkzeuge basieren sollen.

⁶³ vgl. Eckert 2010, Deubzer 2009

⁶⁴ vgl. Albers 2011a, Albers 2014a

⁶⁵ vgl. Albers 2006

⁶⁶ vgl. Günther 1998 S.16

⁶⁷ vgl. Sauter 2011 S.42f.

⁶⁸ vgl. Jänsch 2007

⁶⁹ vgl. Birkhofer 2005, Jänsch 2007 S.167ff.

⁷⁰ vgl. Birkhofer 2005

⁷¹ vgl. Jänsch 2007

Um dies gewährleisten zu können, werden in den folgenden Kapiteln wichtige Grundlagen zu erfolgreichen Vorgehensweisen beim Konstruieren, zu wichtigen thematischen Begrifflichkeiten und zu relevanten, bereits bestehenden Konstruktionsmethoden erläutert.

2.2 Erfolgreiche Vorgehensweisen beim Konstruieren

Das Konstruieren technischer Systeme kann nach ALBERS als eine der schwierigsten mentalen Aufgaben angesehen werden,⁷² weil unter Einfluss einer Vielzahl von Unsicherheiten und Randbedingungen die vielfältigen Lösungsmöglichkeiten und die relevanten Wirkzusammenhänge komplexer Systeme vorausgedacht, verstanden, ausgewählt, kombiniert, dokumentiert und kommuniziert werden müssen. Diese Leistungen und der damit einhergehende Einfluss guter Konstrukteure auf den Erfolg eines Unternehmens⁷³ würden jedoch oft unterschätzt – und seien mitnichten durch Computerprogramme ersetzbar.⁷⁴ Um Konstrukteure bei ihrer anspruchsvollen Arbeit zu unterstützen, untersucht die Konstruktionswissenschaft seit mehreren Dekaden, welche Fähigkeiten und Vorgehensweisen beim Konstruieren ausschlaggebend für einen Produkterfolg sind und wie Konstrukteure dabei methodisch begleitet werden können.⁷⁵ Auf den folgenden Seiten wird eine knappe Übersicht dazu gegeben. Für eine umfangreiche Darstellung der vielfältigen Sichtweisen und Einflüsse auf den Konstruktionsprozess sei auf die jeweils zitierten Arbeiten verwiesen.

2.2.1 Persönliche Fähigkeiten und ihre Bedeutung für das Konstruieren

Die Tätigkeiten beim Konstruieren, die zu qualitativ guten Lösungen führen, werden maßgeblich geprägt von der *Kreativität* des Konstrukteurs⁷⁶ – sowohl in Einzelarbeit als auch im gemeinsamen Lösen eines Gestaltungsproblems: „*Kreativität ist ein essenzieller Bestandteil ingenieurmäßiger Entwicklung*“.⁷⁷ Unter Kreativität versteht die Literatur allgemein „*die Fähigkeit des Menschen, Ideen, Konzepte, Kombinationen und Produkte hervorzubringen, die in wesentlichen Merkmalen neu sind und dem Bearbeiter vorher unbekannt waren*“.⁷⁸ Wichtig sind dabei besonders die Attribute „neu“ bzw. „unbekannt“. Beim Konstruieren bezieht sich die kreative Leistungsfähigkeit von Systemkonstrukteuren nicht nur auf die Entwicklung neuer

⁷² vgl. Albers 2011a

⁷³ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.291

⁷⁴ vgl. Albers 2011a

⁷⁵ vgl. Ehrlenspiel 2009 S. 241ff., Albers 2011b

⁷⁶ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.413

⁷⁷ Deigendesch 2009 S.1

⁷⁸ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.413

Lösungsprinzipien, sondern besonders auf die zielgerichtete Gestaltvariation, um die Potenziale der übernommenen Prinzipien bestmöglich zu nutzen.⁷⁹

Entscheidend für das Erreichen solcher Lösungen sei „*die Übertragung bekannter Zusammenhänge auf neue Situationen, wie auch die Entdeckung neuer Beziehungen zwischen bekannten Elementen*“.⁸⁰ Kreativität leitet sich damit sowohl aus *intuitiv-assoziativen* als auch aus *induktiv-deduktiven* Denk- und Handlungsmustern ab, aus denen neue (Gestaltungs-)Ideen entstehen können. Eine wesentliche Schlussfolgerung daraus ist, dass Kreativität im Bereich der wichtigen intuitiv-assoziativen Denkmuster, derentwegen Konstruieren auch „künstlerisch“ genannt wird,⁸¹ „*weder ein planbarer noch deterministischer Prozess*“ ist.⁸² Dies steht zum Teil im Widerspruch zu Ansätzen des Qualitätsmanagements, das „*für die Produktentwicklung stabile und standardisierte Prozesse*“ fordert.⁸³ Um im Kontext der Problemlösung beim Konstruieren zu qualitativ hochwertigen Lösungen zu gelangen, können sich Konstrukteure entsprechend nicht nur auf ihre künstlerisch-kreativen Fähigkeiten verlassen. Auch vorausschauendes, systematisches und induktiv-deduktives Denken und Handeln spielt in einem Qualitäts- und Effizienzorientierten Unternehmensumfeld eine große Rolle.

GÜNTHER ordnet in diesem Zusammenhang die wichtigsten Grundeigenschaften eines Konstrukteurs in fünf Kategorien: Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Emotion und Motivation.⁸⁴ Die drei erstgenannten Kategorien werden aufgrund ihrer Bedeutung für die vorliegende Arbeit nachfolgend kurz erläutert, für eine weiterführende Übersicht wird exemplarisch auf die Arbeiten von DÖRNER, KLÄGER, GÜNTHER, und WIEDNER verwiesen.⁸⁵

- *Wissen*: Fachwissen und praktische Erfahrung sind zwei wichtige Faktoren für das Lösen von Konstruktionsproblemen. In der Fachwelt wird zwischen verschiedenen Arten von Fachwissen unterschieden, darunter Sach- bzw. Domänenwissen, Methodenwissen und fallspezifisches Wissen.⁸⁶ Darüber hinaus kann Wissen implizit oder explizit vorliegen,⁸⁷ wobei implizites Wissen personengebunden im Gedächtnis gespeichert ist. Explizites Wissen ist zwar in Form von Bildern, Text, Sprache etc. vermittelbar, liegt jedoch immer als Modell in verkürzter Form vor.

⁷⁹ vgl. Albers 2015a

⁸⁰ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.413

⁸¹ vgl. Redtenbacher 1848, S.IV

⁸² Deigendesch 2009 S.1

⁸³ Deigendesch 2009 S.1

⁸⁴ vgl. Günther 1998 S.26

⁸⁵ vgl. Dörner 1987, Kläger 1993, Günther 1998, Wiedner 2013

⁸⁶ vgl. Sauter 2011 S.42f.

⁸⁷ vgl. Dörner 2006 S.65

- Fähigkeiten:** Eine Fähigkeit bzw. Kompetenz beschreibt die Möglichkeiten einer Person, eine Aufgabe zu bearbeiten bzw. Probleme zu lösen und Entscheidungen zu treffen. In der Fachliteratur wird neben der epistemischen Kompetenz der Informationsspeicherung im Gedächtnis, die zur Aufgabenbearbeitung benötigt wird, auch von heuristischer Kompetenz gesprochen, die Fähigkeiten beim Denken zum Zweck des Problemlösens beschreibt (siehe Abbildung 2.2).⁸⁸ Heuristische Kompetenzen beschreiben die Fähigkeiten einer Person, Muster und Sachverhalte zu erfassen bzw. zu erkennen, Informationen produktiv zu verarbeiten, sowie Gegebenheiten zu bewerten und Entscheidungen zu treffen. Darüber hinaus werden in der Fachliteratur wichtige soziale Fähigkeiten, die das Kommunikationsverhalten, Teamwork, ethische Verantwortung etc. betreffen, behandelt.⁸⁹
- Fertigkeiten:** Fertigkeiten sind durch Übung und Wiederholen zum Teil automatisierte Tätigkeitskomponenten, die nicht einer permanenten Steuerung des Bewusstseins bedürfen.⁹⁰ Sie werden in der Konstruktion z. B. beim Skizzieren zur Repräsentation eines Konstruktionsgegenstands verwendet.⁹¹ LIEM betont die Bedeutung der Fertigkeiten zur Repräsentation beim Konstruieren „(z. B. das Erstellen von Skizzen, Zeichnungen, CAD-Modellen oder physischen Modellen), da hierdurch die Kommunikation und Entscheidungsprozesse in der Konstruktion unterstützt werden.“⁹²

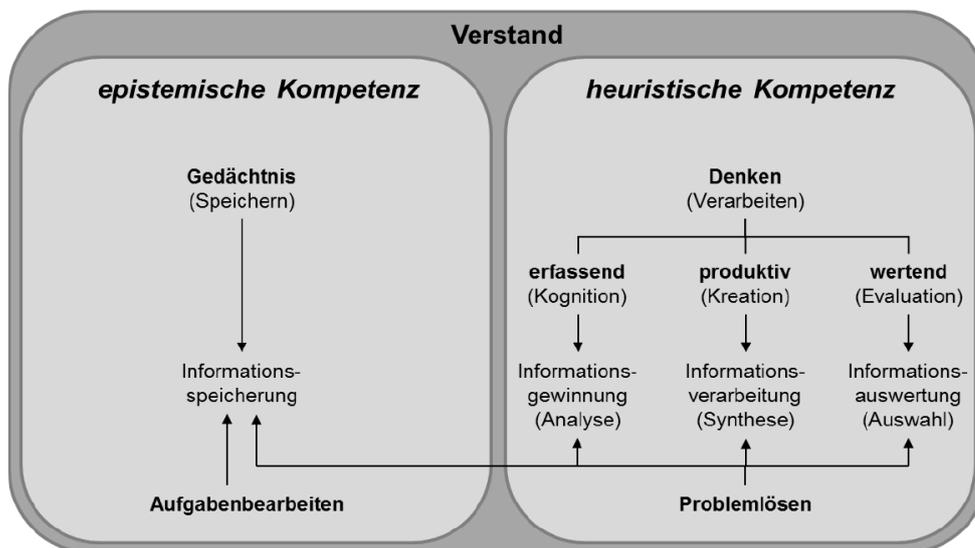


Abbildung 2.2: Wichtige Kompetenzen beim Konstruieren in Anlehnung an KLÄGER⁸⁸

⁸⁸ vgl. Kläger 1993 S.24

⁸⁹ vgl. Wiedner 2013 S.12ff.

⁹⁰ vgl. Seel 2003 S.208

⁹¹ vgl. acatech 2012 S.24

⁹² Wiedner 2013 S.15 nach Liem 2011

2.2.2 Denk- und Handlungsstrategien beim Konstruieren

Neben den oben dargestellten Grundeigenschaften werden in der Konstruktionswissenschaft bestimmte Denk- und Handlungsstrategien diskutiert, die in der Konstruktionspraxis beobachtet werden können. Nachfolgend werden dazu sowohl deskriptive Ergebnisse empirischer Untersuchungen als auch daraus abgeleitete präskriptive Empfehlungen der Konstruktionsmethodik vorgestellt.

HACKER⁹³ stellt fest, dass Konstrukteure oft sprunghaft vorgehen und mehrere Strategien wechselseitig verfolgen. Er unterscheidet opportunistische und systematische Vorgehensweisen auf Basis von effektuaem und kausalem Denken. Häufig sei das Vorgehen nicht von einer übergeordneten Systematik, sondern von Auffälligkeiten und Gelegenheiten gelenkt. HACKER spricht daher auch von *opportunistischem Vorgehen*. Gleichwohl müssen diese Denk- und Handlungsstrategien durchaus als ein grundsätzlich zielgerichtetes und hypothesengeleitetes Vorgehen verstanden werden. Es sei zurückzuführen auf Mustererkennung und Assoziation,⁹⁴ wobei bereits gelöste Teilprobleme erfahrungsbasiert wiedererkannt und nachfolgend auf die vorliegende Problemstellung adaptiert würden. Charakteristisch sei dabei eine lokale Vorgehensweise,⁹⁵ die in einem Widerspruch steht zu klassischen konstruktionsmethodischen Vorgehenssystematiken,⁹⁶ nach denen eine optimale Lösungskombination nur durch eine systematische Exploration des gesamten Lösungsraums erschlossen wird. „Aus Gründen der kognitiven Ökonomie wird der systematische dekompositorische Weg nicht gegangen, sondern der Konstrukteur folgt lokalen Hinweisen – Gelegenheiten – im Prozess, die nach seinem Vorwissen mit vermutlich nützlichen Teillösungen für den zu bearbeitenden Auftrag verbunden sind.“⁹⁷ Nur wenn diese Strategie nicht zum Erfolg führt, wird das Problem durch eine systematische Analyse vertieft erörtert, etwa „durch Verdeutlichungsversuche von Problemteilen“, beispielsweise durch Versuche oder Simulationen.⁹⁸ Dabei könne so lange ein systematisches Vorgehen beobachtet werden, „bis sich erneut eine Situation ergibt, die für das opportunistische Vorgehen geeignet scheint“.⁹⁹

WIEDNER beschreibt analog dazu, dass in Entwicklungsprojekten zwei übergeordnete Handlungsmuster beobachtet werden können. Demzufolge seien „Konstrukteure mit umsetzungs-orientiertem Handlungsmuster stark auf die Validierung einer zufriedenstellenden Lösung fokussiert und betrachten bei der überwiegend konkreten

⁹³ vgl. Hacker 1997, Hacker 2002

⁹⁴ vgl. Hacker 2002 S.14

⁹⁵ vgl. Hacker 2002 S.144

⁹⁶ vgl. Pahl & Beitz 2005

⁹⁷ Hacker 2002 S.144

⁹⁸ Hacker 1996 S.147

⁹⁹ Lemburg 2009 S.71 nach Hacker 2002

*Lösungssuche nur wenige Alternativen. Dem gegenüber stehen Konstrukteure mit einem Systematik-orientierten Handlungsmuster, welche bei der Lösungssuche auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen versuchen eine möglichst vollständige Betrachtung der Lösungsvielfalt zu erreichen, um eine möglichst optimale Lösung zu entwickeln. Die Effektivität und Effizienz der beiden Handlungsmuster variiert je nach Problemsituation und Problemstellung.*¹⁰⁰

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass auch bei einer Zusammenarbeit mehrerer Fachleute jeweils individuelle Formen der methodischen Unterstützung angebracht sind. EHRENSPIEL unterscheidet beispielsweise bei Methoden der Lösungssuche zwischen Kreativitätstechniken, die ein intuitiv-assoziatives Vorgehen begünstigen,¹⁰¹ und solchen Methoden, die vorrangig ein diskursives und deduktives Vorgehen erfordern.¹⁰² Die Auswahl sollte dabei jeweils situationsspezifisch erfolgen, wobei die Anwendung ggf. flexibel an die jeweilige Problemsituation angepasst werden müsse. Ein striktes Befolgen präskriptiver Systematiken, wie es von der klassischen Konstruktionsmethodik vorgeschlagen wird, hat sich in der Praxis nicht bewährt.¹⁰³

In der konstruktionswissenschaftlichen Literatur werden aus den Erkenntnissen der durchgeführten empirischen Untersuchungen Empfehlungen für Denk- und Handlungsstrategien abgeleitet, die beim Konstruieren besonders erfolgversprechend scheinen. Nachfolgend kann daraus nur ein kleiner Ausschnitt wiedergegeben werden, der von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist. Wesentliche Kriterien sind ein umfangreicher Wissenserwerb, die Modellbildung, sowie Systematiken zur Unterstützung individueller Denk- und Handlungsstrategien.

Wissenserwerb: Der Erwerb und die Nutzung von Wissen können damit als zentraler Erfolgsfaktor der Produktentwicklung betrachtet werden. Empirische Studien heben immer wieder hervor, dass die sorgfältige Klärung von auftretenden Problemen über einen zielgerichteten Konstruktionsverlauf entscheidet.¹⁰⁴ Sie adressieren damit über die Anwendung von bestehendem (Erfahrungs-)Wissen hinaus insbesondere den kontinuierlichen Erwerb neuen Wissens. Dass Wissen und Erfahrung im Konstruktionsprozess eine zentrale Rolle einnimmt, stellte schon REDTENBACHER fest. Er betonte die Bedeutung der Erfahrung bei der Suche nach neuen Lösungen, fügte jedoch mit Bezug auf den immer wieder aufs Neue

¹⁰⁰ Wiedner 2013, Kurzfassung

¹⁰¹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.413ff.

¹⁰² vgl. Ehrlenspiel 2009 S.417ff.

¹⁰³ vgl. Albers 2011a; Eckert 2010

¹⁰⁴ vgl. Hacker 2002 S.29

erforderlichen Wissenserwerb unmittelbar hinzu, dass „*man durch Versuche oder durch rein wissenschaftliche Mittel schneller und sicherer das Ziel erreichen kann.*“¹⁰⁵

Modellbildung: Eng verbunden mit dem Erwerb und der Anwendung von Wissen ist die Auswahl geeigneter *Formen der Modellbildung*. STACHOWIAK formuliert charakteristische Merkmale von Modellen,¹⁰⁶ wonach ein Modell ein Abbild eines Originals darstellt, das nur solche Attribute umfasst, die dem jeweiligen Modellerschaffer oder Modellnutzer relevant erscheinen. Modelle erfüllen dadurch jeweils einen bestimmten Zweck, der für gewöhnlich in der Gewinnung, Dokumentation und Kommunikation neuer Erkenntnisse liegt (siehe Abbildung 2.3).

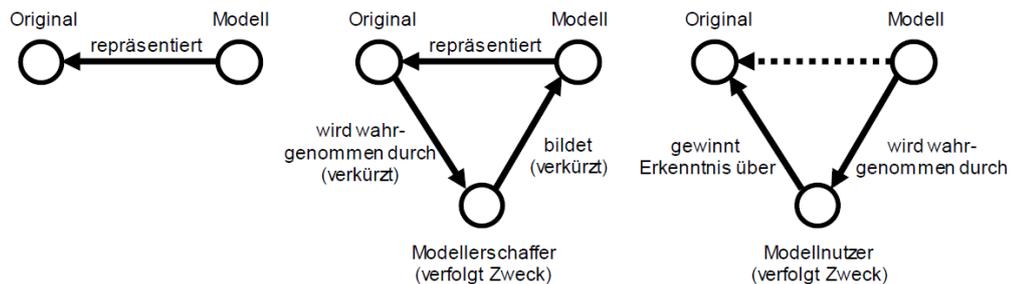


Abbildung 2.3: Modellbegriff, Modellbildung und Modellnutzung nach LOHMEYER¹⁰⁷

Bekannt ist, dass Modelle sowohl in der geistigen Vorstellung eines Konstrukteurs, d. h. als Mentalmodell, wie auch explizit, d. h. als von mehreren Individuen wahrnehmbares Realmodell, vorliegen können.¹⁰⁸ Explizite Modelle unterstützen die Kommunikation, indem sie individuelle Wahrnehmungen bzw. mentale Modelle auf eine gemeinsame Basis zurückführen – sofern sie konsequent genutzt und in ihrer Konnotation allen Beteiligten bekannt sind.¹⁰⁹ Auch für Einzelpersonen können explizite Modelle hilfreich sein, um das Arbeitsgedächtnis zu entlasten und den individuellen Reflexionsprozess zu unterstützen.¹¹⁰

Da die mentalen Prozesse der Modellbildung beim Problemlösen oft visuell konkret ablaufen,¹¹¹ könne häufig eine schnelle Vorfixierung auf eine mental visualisierte Lösung beobachtet werden.¹¹² Auf der anderen Seite trage laut HANNAH diese mentale Visualisierungsneigung dazu bei, dass Informationen mit Hilfe von grafischen Repräsentationen des Konstruktionsgegenstands besonders prägnant

¹⁰⁵ Redtenbacher 1852 S.285

¹⁰⁶ vgl. Stachowiak 1973, S.131ff.

¹⁰⁷ vgl. Lohmeyer 2013 S.17

¹⁰⁸ vgl. Ponn 2011 S.19

¹⁰⁹ vgl. Birkhofer 2003

¹¹⁰ vgl. Hacker 2002 S.63ff.

¹¹¹ vgl. Stacey 2003

¹¹² vgl. Alink 2010 S.21

und effizient erfasst, dokumentiert und kommuniziert werden können.¹¹³ Grafische Modelle eignen sich demnach in der Konstruktion besonders gut, um geometrische Sachverhalte darzustellen und abstrakte Zusammenhänge zu visualisieren; tabellarische Darstellungsformen eignen sich hingegen besser zur Strukturierung, zum Vergleich und zur Auswertung von Informationen (z. B. Matrizen, Portfolios, Cluster-Diagramme etc.).¹¹⁴

Aus den verschiedenen Perspektiven der bei einer Produktentwicklung beteiligten Fachbereiche resultieren jeweils unterschiedliche Modelle, die Eigenschaften, Funktionen und das Verhalten eines Produkts beschreiben. Im Fokus der Mechanik-Konstruktion im Maschinenbau stehen besonders Modelle der physischen Produktgestalt. In der Elektrotechnik und Elektronik werden besonders die physikalischen *Eigenschaften* von Komponenten und deren zeitliches Zusammenspiel betrachtet. In der Informatik spielen vor allem der abstrakte *Funktionsbegriff* und dessen logische Kausalität eine zentrale Rolle für die Strukturbildung von Softwaresystemen. Auch wenn disziplinspezifische Quellen diese Begriffe zum Teil anders bezeichnen, spielen in Modellen aller Fachbereiche (Wirk-)Strukturen, Eigenschaften, Funktionen und das Verhalten von (Teil-)Systemen und ihrer Komponenten eine herausragende Rolle.¹¹⁵

Denk- und Handlungsstrategien: Ausgehend von den persönlichen Grundeigenschaften und Neigungen von Konstrukteuren formuliert z. B. EHRENSPIEL Empfehlungen,¹¹⁶ die sich auf die begrenzte Leistungsfähigkeit des *Kurzzeit-* und des *Langzeitgedächtnis* beziehen, sowie auf die menschliche Tendenz zur *Aufwands- und Zeitminimierung*, die sich darin äußert, dass „den unbewusst, intuitiv ablaufenden Vorgängen den Vorzug vor diskursiven, rational gesteuerten“¹¹⁷ Vorgängen gegeben wird. EHRENSPIEL fasst die bestehenden Forschungsarbeiten verschiedener Autoren zu Denk- und Handlungsstrategien zusammen, von denen für die vorliegende Arbeit vor allem die Folgenden von Bedeutung sind:¹¹⁸

- I. Intensive Ziel- und Mittelklärung (Aufgabenklärung) betreiben
- II. Zerlegung eines Gesamtproblems in Teilprobleme, pendeln zwischen dem Ganzen und dem Detail
- III. Iterative und sequenzielle Arbeitsweisen: vom Qualitativen zum Quantitativen, vom Abstrakten zum Konkreten, vom Groben zum Feinen etc.

¹¹³ vgl. Hannah 2011 S.444

¹¹⁴ vgl. Lindemann 2009b S.43ff.

¹¹⁵ vgl. Krehmer 2012 S.71f.

¹¹⁶ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.75ff.

¹¹⁷ Ehrlenspiel 2009 S.76

¹¹⁸ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.76

- IV. Informationen auslagern und zusammenfassen
- V. Zusammenarbeit, Erfahrung anderer Fachleute einsetzen
- VI. Mehrere Lösungsmöglichkeiten suchen und begründet auswählen
- VII. Intensive Eigenschaftsanalyse alternativer Lösungen durchführen
- VIII. Wichtige Entscheidungen rational und nicht emotional treffen

Die Erläuterung dieser Vorgehensstrategien im nachfolgenden Abschnitt zeigt, dass ihre Bedeutung für die vorliegende Arbeit hauptsächlich in der Analyse von Konstruktionsproblemen liegt:

Selbst bei einer inkrementellen Weiterentwicklung eines Produkts kann nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass das Ausgangsprodukt hinreichend bekannt und im Detail verstanden ist. Eine intensive Klärung der angestrebten Ziele und der verfügbaren Mittel (I) ist daher besonders wichtig, um zu klären, welche Eigenschaften eines Produkts weiterentwickelt werden sollen und wie dies möglichst effizient erreicht werden kann. Grundlage dafür ist ein ausgeprägtes Verständnis für das Konstruktionsproblem im Ganzen wie im Detail (II). Dazu müssen qualitative wie auch quantitative Zusammenhänge betrachtet werden (III).

Um die gewonnenen Erkenntnisse mental und in Zusammenarbeit mit anderen Fachleuten (V) verarbeiten zu können, müssen sie in einer gemeinsamen Sprache und in Modellen gedacht, expliziert und kommuniziert werden (IV). Die Modellbildung unterstützt diesen Austausch, um z. B. den Problemraum¹¹⁹ möglichst vollständig zu erfassen und Lösungsalternativen zu verifizieren und zu validieren (VII). Gleichzeitig zwingt das Explizieren von Informationen dazu, sie in einer übersichtlichen Form darzustellen und miteinander in Beziehung zu setzen. Oft werden bereits hierbei neue Einsichten und Anregungen für eine – nicht zwingend optimale – Problemlösung gewonnen.¹²⁰

An dieser Stelle spielt nun die oben erwähnte, menschliche Tendenz zur Aufwands- und Zeitminimierung¹²¹ und zu einem verstärkt opportunistischen Vorgehen¹²² eine ebenso bedeutende Rolle wie die Neigung, Entscheidungen bereits auf Grundlage qualitativer Erkenntnisse (z. B. Mustererkennung¹²³) zu treffen.¹²⁴ Diesen Neigungen entgegenwirken können gezielt vertiefte, quantitative Untersuchungen (III), sowie

¹¹⁹ ein Problemraum kann nach LOHMEYER 2013 S.99 als eine mentale und somit subjektive, multidimensionale Repräsentation gesetzter Ziele und erkannter Randbedingungen aufgefasst werden.

¹²⁰ z. B. basierend auf der von HACKER 2002 S.14 beschriebenen Mustererkennung und Assoziation.

¹²¹ vgl. EHRLenspiel 2009 S.76

¹²² vgl. HACKER 1997 S.1094

¹²³ vgl. HACKER 2002

¹²⁴ vgl. WIEDNER 2013 S.47, S.129

systematische Suchmethoden wie z. B. Ordnungsschemata,¹²⁵ um weitere Lösungen zu erarbeiten (VI).¹²⁶ Die durchgehende Orientierung an Vorgehenssystematiken zur Problemlösung (z. B. SPALTEN¹²⁷) kann dazu beitragen, Entscheidungen unter Berücksichtigung aller wichtigen Faktoren und im Austausch mit anderen Fachleuten (V) rational begründet zu treffen (VIII).

Ergänzend zu diesen erfolgreichen Vorgehensstrategien identifiziert BENDER weitere charakteristische Merkmale für Entwurfsprozesse in der Produktentwicklung, die zum Teil „im Widerspruch zu Vorgehensmodellen der präskriptiven Konstruktionsmethodik stehen“.¹²⁸

- Sie sind häufiger durch ein iterativ-korrigierendes Vorgehen charakterisiert als durch eine parallele Generierung mehrerer Lösungsvarianten.
- Sie werden durch Personenmerkmale wie Fähigkeiten, Erfahrung und (heuristische bzw. methodische) Kompetenz entscheidend beeinflusst.
- Sie sind gekennzeichnet durch einen ständigen multimodalen Wechsel zwischen visuellen (Bildern) und abstrakt-verbalen (Begriffen) Problem-, Ziel- und Lösungsrepräsentationen.
- Sie werden durch organisationale Einflüsse geprägt und unterliegen dynamischen Veränderungen von Anforderungen und Randbedingungen.
- Sie verfolgen eher das Ziel, zufrieden stellende Lösungen unter akzeptablem Aufwand zu entwickeln als ideale Lösungen.

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen, individuellen Denk- und Handlungsstrategien beim Konstruieren sind vor dem Hintergrund zu betrachten, dass in Unternehmen nur ein unscharfes, uneinheitliches Berufsbild von Konstrukteuren vorherrscht.¹²⁹ Um dem entgegenzuwirken, schlagen ALBERS, DENKENA und MATTHIESEN vor, eine begriffliche Unterscheidung gemäß der fachlichen Spezialisierung von Produktentwicklern einzuführen. Sie schlagen die Bezeichnung *Systemkonstrukteur* für jene Entwicklungsingenieure vor, die üblicherweise mit dem Lösen von Konstruktionsproblemen beauftragt werden und deren Tätigkeitsschwerpunkt in der Systemsynthese liegt.¹³⁰ Die physische, virtuelle und physisch-virtuell gemischte Verifikation und Validierung der daraus entstehenden Lösungen mittels Versuchen, Berechnungen und Simulationen¹³¹ sei hingegen vorwiegend dem Tätigkeitsfeld eines *Validierungsingenieurs* zuzurechnen: Er

¹²⁵ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.418ff.

¹²⁶ vgl. Frankenberger 1997 S.202

¹²⁷ vgl. Albers 2005: Das Akronym SPALTEN steht für die folgenden Aktivitäten der Problemlösung: Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen suchen, Lösungen auswählen, Tragweitenanalyse, Einführen und Umsetzen, sowie Nachbereiten und Lernen.

¹²⁸ Bender 2004 S.232f.

¹²⁹ vgl. acatech 2012 S.98

¹³⁰ vgl. acatech 2012 S.93

¹³¹ vgl. Albers 2008b, Düser 2010

„untersucht das System und prüft die Wechselwirkungen mit dem Sub- und Supersystemen“.¹³² Neben einer intensiven Zusammenarbeit von Systemkonstruktoren und Validierungsingenieuren sei ein gegenseitiges Verständnis für die fachlichen Grundlagen unerlässlich, um eine enge Verzahnung von Analyse- und Syntheseaktivitäten gewährleisten zu können.

2.2.3 Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten beim Konstruieren

Wie bereits aus den vorangegangenen Kapiteln indirekt hervorgeht, kann Konstruieren als eine wechselseitige Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten beschrieben werden, die ineinander verschachtelt verlaufen und untrennbar zusammenhängen.¹³³ WEBER beschreibt sie als ein kontinuierliches Bestimmen und Festlegen von Produkteigenschaften¹³⁴ und ALINK stellt fest, dass „bei weitem nicht jede Analyserkenntnis und nicht jeder Syntheseschritt zielführend ist“.¹³⁵

HACKER, BIRKHOFFER¹³⁶ und andere Autoren heben hervor, dass ausführliche Analysetätigkeiten ein wesentliches Merkmal erfolgreicher Entwicklungsprojekte seien und dass dabei die zur Lösungsfindung wesentlichen Erkenntnisse erarbeitet werden. Die Bedeutung der Syntheseschritte beim Konstruieren liege wiederum in der Definition von Entwicklungszielen und im Festlegen der Produktgestalt „mit dem Ziel, gewünschte Funktionen effizienter oder besser zu realisieren und ungewünschte Funktionen zu vermeiden.“¹³⁷ ALBERS und LOHMEYER erklären das Wechselspiel aus Analyse und Synthese mit dem erweiterten ZHO-Modell (Ziel-, Handlungs- und Objektsystem-Modell, siehe Abbildung 2.4).¹³⁸

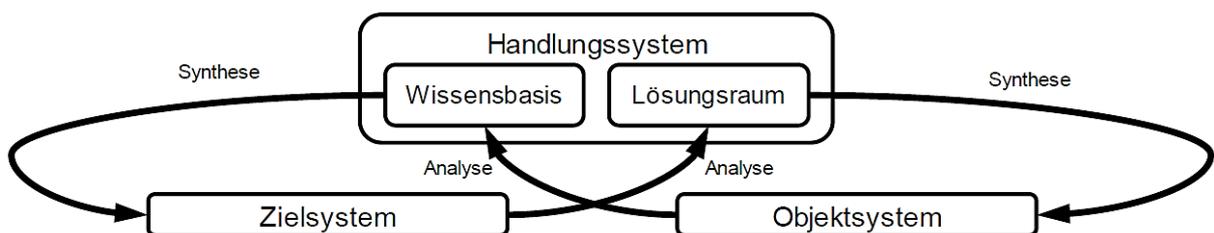


Abbildung 2.4: Abfolge von Analyse- und Syntheseschritten nach ALBERS und LOHMEYER¹³⁸

KÖHLER fasst die beiden wesentlichen Vorgehensmöglichkeiten bei der **Synthese** von Elementen des Objektsystems wie folgt zusammen: „Allgemein können

¹³² vgl. acatech 2012 S.93

¹³³ vgl. Alink S.17f.

¹³⁴ vgl. Weber 2001

¹³⁵ Thau 2013 S.13

¹³⁶ vgl. Hacker 2002, Birkhofer 1980

¹³⁷ Albers 2011c

¹³⁸ vgl. Albers 2012b, Lohmeyer 2013

*Lösungsmöglichkeiten entweder durch Kreativitätstechniken neu entwickelt oder durch systematische Variation der bisherigen Lösung generiert werden.*¹³⁹ Mit Blick auf die **Analyse** dieser Lösungen stehen zur Untersuchung des Verhaltens technischer Systeme

- sowohl *theoretische* Methoden zur Verfügung, die eine Herleitung bzw. Berechnung auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten ermöglichen,
- als auch *empirische* Methoden, bei denen neue Erkenntnisse mittels Parametervariation und realen bzw. virtuellen Erprobungen (Versuch und Simulation) gewonnen werden.

WEBER betont, dass im Verlauf eines Konstruktionsprozesses dieselben Produkteigenschaften abhängig vom Produktreifegrad mit unterschiedlichen Methoden und Werkzeugen analysiert und synthetisiert werden müssen. Während beispielsweise in einer frühen Phase des Konstruierens zunächst nur überschlägige Berechnung zur Verifizierung eines Gestaltungsvorschlags durchgeführt werden können, würden mit zunehmendem Konstruktionsfortschritt beispielsweise FEM¹⁴⁰-Simulationsmethoden eingesetzt.¹⁴¹ Ebenso werden bei Analyse- und Syntheseschritten in frühen Phasen des Konstruierens vorzugsweise Skizziertechniken angewendet, wohingegen im weiter fortgeschrittenen Verlauf z. B. 3D-CAD-Werkzeuge zum Einsatz kommen.¹⁴²

Das wechselseitige Wiederholen von Analyse-Synthese-Schritten ist nach WEBER erst *„beendet, wenn alle zur Herstellung des Produkts benötigten Merkmale definiert sind und wenn alle relevanten Eigenschaften erstens bestimmt werden können und zweitens den ursprünglich geforderten Produkteigenschaften hinreichend gut entsprechen.“*¹⁴³

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert kann zwischen intuitiv-assoziativen und induktiv-deduktiven Denk- und Handlungsmustern in der Abfolge von Analyse-Synthese-Schritten unterschieden werden. Da sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung von Lösungsvorschlägen durch *„Rückschluss aus der vorliegenden Gestalt“*¹⁴⁴ befasst, liegt der Fokus auf induktiv-deduktiven Analyse-Synthese-Schritten. In den jeweiligen **Analyseschritten** werden analytische und empirische Methoden¹⁴⁵ zum Erkennen und Verstehen von Einflussbeziehungen bzw. Wirkzusammenhängen

¹³⁹ Köhler 2009 S.129

¹⁴⁰ Finite Elemente Methode

¹⁴¹ vgl. Weber 2001

¹⁴² vgl. Lindemann 2009a S.11

¹⁴³ Weber 2001

¹⁴⁴ Matthiesen 2011

¹⁴⁵ diese beziehen sowohl Methoden zur theoretischen Herleitung bzw. Berechnung auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten, als auch Methoden zur Parametervariation bei praktischen realen und virtuellen Erprobungen (Versuch und Simulation) mit ein.

behandelt, die die Qualität der Funktionserfüllung¹⁴⁶ eines Produkts bestimmen. Dafür relevant sind

- sowohl *qualitative* Methoden, die ein grundlegendes Verständnis über die Funktionen und funktionsrelevanten Gestaltelemente ermöglichen,¹⁴⁷
- als auch *quantitative* Methoden, mit denen detaillierte Erkenntnisse über Einflussbeziehungen zwischen den funktionsbestimmenden, technischen Eigenschaften eines Produkts ermittelt werden können.¹⁴⁸

In den jeweils darauf aufbauenden **Syntheseschritten** liegt der Fokus auf einem ständigen Wechsel zwischen qualitativem und quantitativem Gestalten,¹⁴⁹ beispielsweise „*durch systematische Variation der bisherigen Lösung*“:¹⁵⁰

- Durch *qualitatives* Gestalten werden die Art der Gestaltelemente, die Struktur ihrer Anordnung und damit die Funktionen eines Produkts in qualitativer Form festgelegt,
- Durch *quantitatives* Gestalten werden die geometrischen und stofflichen Eigenschaften von Gestaltelementen, ihre Lage und Ausrichtung im Raum und dadurch die funktionalen Eigenschaften eines Produkts quantitativ festgelegt.

Während für Analysezwecke das entwicklungsmethodische Spektrum der Theorien, Methoden, und Modelle vergleichsweise breit gefächert ist, stellt sich das Spektrum der Synthese-unterstützenden Hilfsmittel aus entwicklungsmethodischer Sicht weniger vielfältig dar. ROOZENBURG¹⁵¹ stellt dazu fest, „*dass für Rückschlüsse von der Gestalt auf die Funktion eine Vielzahl von Methoden und wissenschaftliche Erkenntnisse verfügbar sind, wohingegen das Überführen von gewünschten Funktionen in eine konkrete Produktgestalt weitgehend von den kreativen*¹⁵² *Fähigkeiten und Eingebungen der Konstrukteure abhängig ist.*“¹⁵³ Er betont damit den Bedarf für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten, die Systemkonstrukteure beim Entwickeln von Gestaltungsideen unterstützen.

2.2.4 Zwischenfazit

Konstruieren ist ein kreativer Prozess, der sowohl durch intuitiv-assoziative als auch durch induktiv-deduktive Denkmuster charakterisiert ist.¹⁵⁴ Diese sind je nach Person individuell unterschiedlich stark ausgeprägt und bestimmen gemeinsam mit der

¹⁴⁶ siehe Kapitel 2.3.1

¹⁴⁷ Beispiele: siehe z. B. Thau 2013 S.103ff.

¹⁴⁸ Beispiele: siehe z. B. Thau 2013 S.133ff.

¹⁴⁹ vgl. Feldhusen 2010

¹⁵⁰ Köhler 2009 S.129

¹⁵¹ vgl. Roozenburg 1995 S.53ff.

¹⁵² gemeint sind hier vorrangig intuitiv-assoziative Denkmuster

¹⁵³ Roozenburg 1995

¹⁵⁴ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.413

vorhandenen Erfahrung die Denk- und Handlungsstrategien beim Konstruieren.¹⁵⁵ WIEDNER unterscheidet Konstrukteure entsprechend ihren persönlichen, erfolgreichen Vorgehensstrategien und zeigt typische Handlungsmuster auf, von denen das Systematik-orientierte Handlungsmuster die Zielgruppe für die vorliegende Arbeit definiert: Konstrukteure, die *„auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen versuchen, eine möglichst vollständige Betrachtung der Lösungsvielfalt zu erreichen, um eine möglichst optimale Lösung zu entwickeln.“*¹⁵⁶

Neben diesen durch die Persönlichkeit und Erfahrung geprägten Vorgehensstrategien spielen auch die erlernten Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie die Nutzung und die kontinuierliche Erweiterung des bestehenden (Erfahrungs-)Wissens eine entscheidende Rolle beim Lösen von Konstruktionsproblemen.¹⁵⁷ Sie bestimmen mit, auf welche Weise Informationen gewonnen, verarbeitet und ausgewertet werden.¹⁵⁸ Die Bildung von Modellen unterstützt diese Vorgänge, indem relevante Sachverhalte und Zusammenhänge ausgewählt, strukturiert, reflektiert und kommuniziert werden.¹⁵⁹ Neben grafischen Modellen, die das visuelle Vorstellungsvermögen von Konstrukteuren besonders gut ansprechen,¹⁶⁰ werden dazu häufig auch tabellarische Darstellungsformen wie Matrizen, Portfolios, Cluster-Diagramme etc. verwendet.¹⁶¹

Charakteristisch beim Konstruieren ist nicht nur ein hypothesengeleitetes, wechselseitig opportunistisch-systematisches Vorgehen,¹⁶² sondern auch eine iterative Abfolge einzelner, ineinander verschachtelter Analyse- und Syntheseschritte.¹⁶³ Diesen unmittelbar aufeinander aufbauenden Schritten zum Lösen von Konstruktionsproblemen steht ein fragmentiertes Spektrum von Konstruktionsmethoden gegenüber, die jeweils auf spezielle Anwendungssituationen ausgerichtet *„nur singular anzuwenden sind und somit nur ganz bestimmte Aspekte in einer Produktentwicklung behandeln können“.*¹⁶⁴ Ein wesentlicher Grund dafür liegt in der großen Vielfalt und der sozio-technischen Komplexität der Konstruktionsprobleme in der Praxis.¹⁶⁵ Dies führt dazu, dass bis heute keine universelle, etablierte Vorgehenssystematik beim Konstruieren bekannt ist. Konstrukteure müssen je nach Bedarfssituation, persönlicher Arbeitsweise, Problemlage und Reifegrad der bereits erreichten (Teil-)Lösung(en) geeignete

¹⁵⁵ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.75ff.

¹⁵⁶ vgl. Wiedner 2013

¹⁵⁷ vgl. Dörner 1987, Kläger 1993, Günther 1998, Wiedner 2013

¹⁵⁸ vgl. Kläger 1993 S.24

¹⁵⁹ vgl. Hannah 2011 S.444

¹⁶⁰ vgl. Eckert 2010

¹⁶¹ vgl. Lindemann 2009b S.43ff.

¹⁶² vgl. Hacker 2002

¹⁶³ vgl. Alink S.17f.

¹⁶⁴ vgl. Alink 2010 S.38

¹⁶⁵ vgl. Günther 1998 S.16, Adamsson 2004 S.5

Methoden und Modelle zur Unterstützung auswählen, situationsspezifisch anpassen und mit ihren persönlich präferierten Denk- und Handlungsstrategien kombinieren.

Die Erkenntnisse der Konstruktionswissenschaft zu den individuellen Denk- und Handlungsstrategien¹⁶⁶ von Konstrukteuren bilden eine wichtige Grundlage für die in Kapitel 4 und 5 vorgestellten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit. Sie tragen zur Entwicklung von Modellierungstechniken bei, die Konstrukteure bei der Analyse und Synthese von Funktion und Gestalt technischer Systeme unterstützen sollen. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Zusammenhänge von Funktion und Gestalt werden im nachfolgenden Kapitel ausführlich vorgestellt.

2.3 Funktion und Gestalt technischer Systeme

Der Marktwert eines technischen Produkts wird mitbestimmt von der von Kunden in der Anwendung wahrgenommenen Qualität der Funktionserfüllung. Sie äußert sich nach PFEIFER und CROSBY unter anderem in der Erfüllung von Anforderungen an die Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Haltbarkeit eines Produkts.¹⁶⁷ Die Herausforderung beim Konstruieren besteht in der Festlegung einer Produktgestalt, die in den vorausgedachten Anwendungsfällen die geforderten Funktionen in der beabsichtigten Qualität ermöglicht. Auch HACKER stellt fest: Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Konstruktion sei die „*Konzentration auf die Objekte, die die Funktion bestimmen*“.¹⁶⁸ Dabei muss eine Vielzahl (teils dynamisch veränderlicher oder unsicherer) technischer, ökonomischer, ökologischer, sozialer und rechtlicher Randbedingungen berücksichtigt werden.¹⁶⁹ Da die Funktionen und die Qualität der Funktionserfüllung eines Produkts nicht unmittelbar, sondern nur indirekt durch das Festlegen der Produktgestalt beeinflusst werden können,¹⁷⁰ befasst sich eine Vielzahl konstruktionswissenschaftlicher Arbeiten mit den Begriffen *Funktion* und *Gestalt*, deren kausalen Zusammenhängen und ihrer Bedeutung für die Produktentwicklung.

2.3.1 Definitionen, Relationen und Perspektiven der Begriffsverwendung

Die Bedeutung des Funktionsbegriffs kann abhängig von der Problemstellung und der Perspektive einer wissenschaftlichen Arbeit,¹⁷¹ vom Anwendungskontext¹⁷² und

¹⁶⁶ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.75ff.

¹⁶⁷ vgl. Pfeifer 2001 S.XXV, vgl. Crosby 1986 S.69, S.72

¹⁶⁸ vgl. Hacker 2002

¹⁶⁹ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.191ff.

¹⁷⁰ vgl. Andreasen 1980

¹⁷¹ vgl. Erden 2008

¹⁷² vgl. Vermaas 2010, Alink 2010 S.176f.

von den Eigenheiten der verwendeten Landes- und Fachsprachen¹⁷³ teils beträchtlich variieren. ALINK und ECKERT verweisen darauf, dass Konstrukteure auffällig unterschiedliche Auffassungen davon haben können, wie ein Produkt funktioniert.¹⁷⁴ Dieses individuelle Verständnis vom Funktionsbegriff beeinflusst maßgeblich deren Fähigkeit, Konstruktionsprobleme zu analysieren.

Die Verständnis-Vielfalt in der Praxis spiegelt sich auch in der Konstruktionswissenschaft: VERMAAS verweist darauf, dass bereits eine beispielhafte Betrachtung von Forschungsarbeiten zu diesem Thema ausreicht, um die Vielfalt unterschiedlicher Auffassungen zu erkennen.¹⁷⁵ Eine Studie von ERDEN listet beispielsweise nicht weniger als 18 konstruktionswissenschaftliche Theorien, Methoden und Modelle mit jeweils unterschiedlichen Auffassungen von Funktion auf.¹⁷⁶ Die Vielzahl unterschiedlicher Interpretationen des Funktionsbegriffs drückt die verschiedenen Sichten der Konstruktionswissenschaft und der Praxis auf die Entwicklung eines Produkts aus.¹⁷⁷

Beispielhaft für die Bedeutungsvielfalt seien die folgenden Definitionen genannt. Nach VDI2221 wird eine Funktion als „*eine Zustandsänderung von Stoff, Energie und Information*“¹⁷⁸ aufgefasst. Dieses Begriffsverständnis entstammt u. a. den Arbeiten von PAHL und BEITZ, die unter einer Funktion eine „*Eigenschaftsänderung von Systemgrößen*“ verstehen, mit der der „*Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen*“ technischer Systeme beschrieben werde.¹⁷⁹ Dies stellt eine vorwiegend produktzentrierte Sichtweise dar, die von den inneren physikalischen Wirkzusammenhängen eines Produkts ausgeht (vgl. Abbildung 2.5).

Funktionen im Sinne von Interaktionen z. B. zwischen einem Benutzer und dem Produkt können damit nur unzureichend beschrieben werden.¹⁸¹ Daher ergänzen CHANDRASEKARAN sowie BROWN und BLESSING, dass eine Funktion ebenso ausdrücke, wie sich ein System in Wechselwirkung mit seiner Umgebung verhält und dass es bestimmte, dazu benötigte Eigenschaften besitze.¹⁸² ALBERS und ALINK schlussfolgern daraus eine Unterscheidung „*zwischen Funktion als beabsichtigte Wirkung und Funktion als Beschreibung der Vorgänge im System*“,¹⁸³ wobei beide Bedeutungen gleichberechtigt verwendet werden könnten.

¹⁷³ vgl. Alink 2010 S.84ff., Eckert 2013

¹⁷⁴ vgl. Eckert 2011

¹⁷⁵ vgl. Vermaas 2010

¹⁷⁶ vgl. Erden 2008

¹⁷⁷ vgl. Alink 2010 S.24

¹⁷⁸ VDI2221 1993

¹⁷⁹ Pahl & Beitz 2005 S.17, 1. Auflage 1977

¹⁸⁰ Stone 1999 S.363

¹⁸¹ vgl. Warell 1999

¹⁸² vgl. Chandrasekaran 2000, vgl. Brown 2005

¹⁸³ vgl. Albers 2008a, Alink 2010 S.25

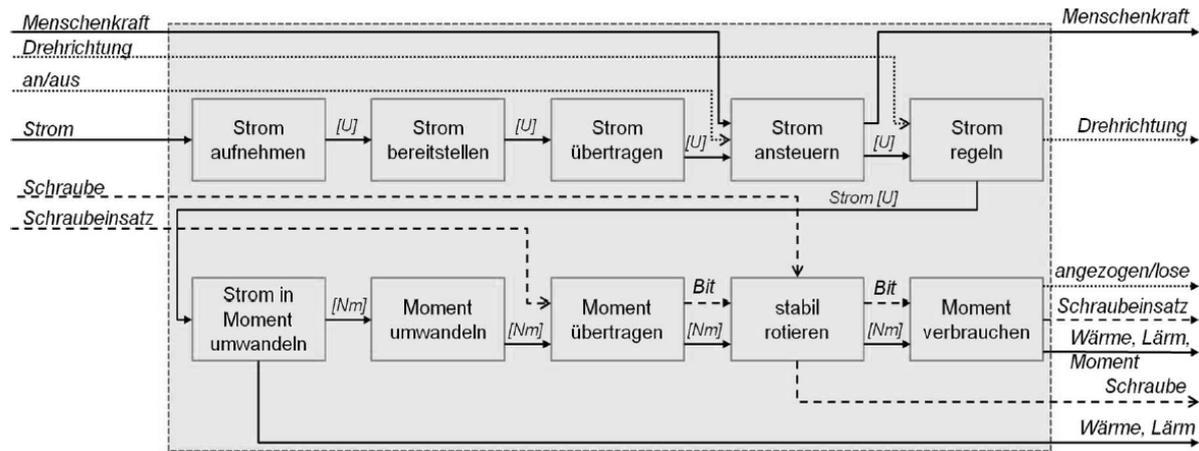


Abbildung 2.5: Funktionsmodell für einen elektrischen Bohrschrauber nach STONE¹⁸⁰

GERO und KANNEGIESSER unterscheiden im *Function-Behaviour-Structure-Model* (FBS) entsprechend dem englischen Sprachgebrauch zwischen dem Begriff *Funktion* als Erfüllung eines beabsichtigten Zwecks und dem erwarteten oder tatsächlichen *Verhalten* eines Produkts, das beschreibt, wie es agiert.¹⁸⁴ Auch UMEDA et al. verstehen unter einer Funktion „eine abstrahierte Beschreibung des gewünschten Verhaltens eines Produkts“.¹⁸⁵ Sie betonen, dass Funktionen eine subjektive, d. h. perspektiv- und interessengebundene Beschreibung eines Produkts darstellen, wohingegen das Produktverhalten in Versuchen objektiv ermittelt werden könnte. ECKERT stellt ergänzend dazu fest, dass im deutschen Sprachgebrauch die Verben *funktionieren* und *verhalten* nahezu synonym verwendet werden.¹⁸⁶

VERMAAS greift das Begriffsverständnis der vorgenannten Autoren auf und zeigt, dass der Funktionsbegriff auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zu verschiedenen Aussagen verwendet werden kann, darunter zur Beschreibung

- von Absichten, die mit dem Produkt erreicht werden sollen (Zweck),
- des beabsichtigten Verhaltens eines Produkts in Relation zu seiner Umwelt
- der tatsächlichen physikalischen Vorgänge, die eine Wirkung erzielen.¹⁸⁷

ALBERS und ALINK¹⁸⁸ leiten aus diesem Begriffsverständnis und den sich daraus im deutschen Sprachgebrauch ergebenden Verwendungsmöglichkeiten folgende Definition ab, die auch in der vorliegenden Arbeit verwendet werden soll:

¹⁸⁴ vgl. Gero 2002

¹⁸⁵ Umeda 1990

¹⁸⁶ vgl. Eckert 2013

¹⁸⁷ vgl. Vermaas 2010

¹⁸⁸ vgl. Albers 2008a, Alink 2010 S.30

Definition 2-1: Funktion (engl.: function)

Der Begriff „Funktion“ kann im deutschen Sprachgebrauch verschiedene Bedeutungen haben:¹⁸⁹ Eine Funktion im Sinne des

- *beabsichtigten Zwecks* beschreibt die Absichten, die durch den Einsatz eines Produkts oder bestimmter Teilsysteme erreicht werden sollen.
- *beabsichtigten Verhaltens* beschreibt die gewünschten Reaktionen eines Produkts oder seiner Teilsysteme auf Einflüsse, die durch Interaktionen mit Umgebungssystemen induziert werden (vgl. Definition 2-5: Verhalten).
- *tatsächlichen Verhaltens* beschreibt die in der Erprobung oder Anwendung festgestellten, erwünschten oder unerwünschten Wirkungen (vgl. Definition 2-5: Verhalten).

Funktionen werden erfüllt durch den Austausch und die Wandlung der Systemgrößen Kraft, Energie, Stoff und/oder Information.¹⁹⁰

Für eine weiterführende, umfassende Übersicht über die Bedeutung und Verwendung des Funktionsbegriffs sei an dieser Stelle exemplarisch auf die Arbeiten von ALBERS, ALINK, ECKERT und VERMAAS verwiesen.¹⁹¹

Aus dem oben genannten Verständnis des Funktionsbegriffs und der einleitend genannten Bedeutung der Qualität der Funktionserfüllung für den Anwender eines technischen Produkts wird deutlich, dass (erwünschte oder unerwünschte) Wirkungen und das daraus resultierende (beabsichtigte und tatsächliche) Produktverhalten von besonderer Bedeutung für die Produktentwicklung sind.

In der konstruktionswissenschaftlichen Literatur wird unter einer Wirkung allgemein „*die technische Nutzung eines physikalischen oder chemischen Effektes*“¹⁹² (z. B. die Übertragung von Kräften durch Reibung) verstanden. Dabei gilt gemäß dem Newton'schen Prinzip „*actio est reactio*“,¹⁹³ dass eine Wirkung immer als Wechselwirkung verstanden werden muss: „*Eine Wirkung kann nur zwischen Partnern stattfinden, die miteinander wechselwirken*“.¹⁹⁴ Maßgeblich verantwortlich für das Zustandekommen einer Wirkung ist jeweils ein Kausalzusammenhang von Ursache und Wirkung, wobei die Wirkung als Vorgang oder Ergebnis dieses Kausalzusammenhangs beschrieben werden kann.¹⁹⁵ Charakteristisch für Wechselwirkungen sind der Austausch und die Wandlung von Systemgrößen wie

¹⁸⁹ vgl. Vermaas 2010, Alink 2010 S.162

¹⁹⁰ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.43 und S.194

¹⁹¹ vgl. Albers 2008a, Alink 2010, Vermaas 2010, Eckert 2013

¹⁹² Thau 2013 S.32, vgl. Alink 2010 S.163

¹⁹³ vgl. Newton 1914 S.15

¹⁹⁴ Matthiesen 2002 S.53

¹⁹⁵ vgl. Kirchner 2013

z. B. Kraft, Energie, Stoff und Information im sogenannten Wirkort, der als Punkt, Linie, Fläche oder Volumen ausgeprägt sein kann.¹⁹⁶ Dies sei der „Ort, an dem durch Wirkflächen und Wirkbewegungen Wirkungen erzwungen oder ermöglicht werden.“¹⁹⁷ ALBERS und MATTHIESEN lokalisieren diese Wirkorte in *Wirkflächenpaaren* (siehe Kapitel 2.3.3).¹⁹⁸

In welcher Weise dort eine Wirkung stattfindet (z. B. Kraftübertragung durch Reibung), wird nach PAHL und BEITZ bestimmt von der Ausgestaltung des gewählten *Wirkprinzips*. Unter einem Wirkprinzip verstehen sie die konstruktive Kombination physikalischer Effekte mit der Anordnung und Geometrie, der Werkstoffe und der Relativbewegungen verschiedener Komponenten und Teilsysteme.¹⁹⁹ Aus einer „Kombination von Wirkprinzipien zum Erfüllen der Gesamtfunktion“ ergibt sich wiederum ein *Lösungsprinzip*,²⁰⁰ das in der Literatur abstrahiert auch als *Wirk-Struktur* bezeichnet wird. Die Wirk-Struktur stellt demnach eine „Verknüpfung von Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zum Erfüllen der Gesamtfunktion“ dar.²⁰¹ ALBERS und MATTHIESEN erweitern dieses Verständnis von einer Wirk-Struktur, indem sie nicht nur die Produkt-inhärenten Wirkorte und Wirkprinzipien, sondern auch die auf das Produkt einwirkenden, funktionsrelevanten Einflüsse miteinbeziehen.²⁰² In der vorliegenden Arbeit werden entsprechend den o. g. Ausführungen folgende Definitionen verwendet:

Definition 2-2: Wirkung (engl.: effect)

Als Wirkung wird in der vorliegenden Arbeit die technische Nutzung physikalischer und chemischer Effekte in physischen Schnittstellen bezeichnet, die als Reaktion auf eine Ursache (z. B. durch Kraft, Energie, Stoff, Information) ablaufen.²⁰³

Relation: Der Vorgang und das Resultat von Wirkungen werden bestimmt durch die in der Konstruktion gewählten Wirkprinzipien und die von den Interaktionspartnern eingebrachten Kräfte, Energien, Stoffe und Informationen.

Beispiele:

- Die Betätigung des Bremspedals eines Fahrzeugs (Ursache) verursacht bestimmte technische Vorgänge, die dazu führen, dass es abbremst (Wirkung).
- Die Wirkungen „Kraftübertragung“ und „Wärmeentwicklung“ erfolgen aufgrund des Effekts „Reibung“ zwischen zwei Wirkflächen entsprechend deren Belastung, Relativbewegung, Anordnung und stofflichen Eigenschaften.

¹⁹⁶ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51

¹⁹⁷ Pahl & Beitz 2005 S.751

¹⁹⁸ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002

¹⁹⁹ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.52

²⁰⁰ Pahl & Beitz 2005 S.750

²⁰¹ Pahl & Beitz 2005 S.751

²⁰² ALBERS und MATTHIESEN verwenden dazu den Begriff „Connector“, siehe Kapitel 2.3.3

²⁰³ vgl. Rodenacker 1991, Pahl & Beitz 2005, Albers 2014a

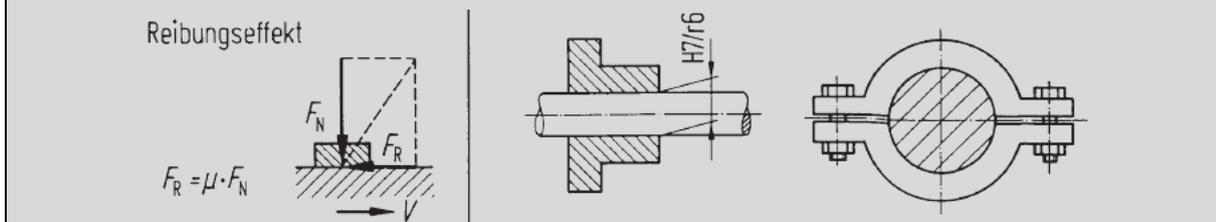
Definition 2-3: Wirkprinzip (engl.: working principle)

Ein **Wirkprinzip** bezeichnet in der vorliegenden Arbeit die prinzipielle Umsetzung einer Funktion in Gestalt. Es beschreibt die Wandlung von Kräften, Energie, Stoff und Information mittels Form-, Kraft- oder Stoffschluss.²⁰⁴ Aus der Festlegung von Wirkprinzipien resultiert auch die Wirk-Struktur eines Produkts.

Relation: Ein Wirkprinzip ergibt sich aus ...

- physikalischen Effekten (z. B. Reibung, magnetische oder elektrostatische Anziehung/Abstoßung, thermische Ausdehnung),
- den von den Interaktionspartnern durchgeführten Relativbewegungen, sowie
- der Anordnung und den (geometrischen, stofflichen) Eigenschaften der beteiligten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen.

Beispiel: Eine kraftschlüssige Übertragung von Drehmoment über den Reibungseffekt „führt je nach Art der Aufbringung der Normalkraft zum Schrumpfverband oder zur Klemmverbindung als Wirkprinzip“²⁰⁵. Mit dieser Prinzipvariation verändert sich auch die korrespondierende Wirk-Struktur:



Die Erfüllung von Funktionen, d. h. die Realisierung eines *beabsichtigten* Verhaltens, ergibt sich nach PAHL und BEITZ aus der Realisierung entsprechender Wirkprinzipien.²⁰⁶ Analog zu diesem qualitativen Zusammenhang wird das *tatsächliche* Verhalten und damit die Qualität der Funktionserfüllung in der Anwendung bestimmt von den durch diese Wirkprinzipien realisierten Wirkungen im Sinne einer Reaktion auf ursächliche Einflüsse (Kraft und Energie, Stoff, Information). ALBERS und MATTHIESEN fassen diesen Zusammenhang von Verhalten, Funktion und Wirkung in der Hypothese zusammen, dass Funktionen eines technischen Systems immer durch Wechselwirkungen mit anderen Interaktionspartnern erfüllt werden.²⁰⁷ Exemplarisch zeigen sie, dass die an einer Zahnradpaarung beobachtbaren Wirkungen durch gezielte Veränderungen an der Geometrie der Wirkorte beeinflusst werden können. Gleichmaßen ändere sich mit den Wirkungen auch das Verhalten des betreffenden technischen Systems (z. B. des Getriebes).²⁰⁸

²⁰⁴ vgl. Rodenacker 1991, Albers 2002, Pahl & Beitz 2005 S.51f. & S.555

²⁰⁵ Pahl & Beitz 2005 S.52

²⁰⁶ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51

²⁰⁷ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002 S.53

²⁰⁸ vgl. Matthiesen 2002 S.110

Aus den obigen Ausführungen geht bereits der enge kausale Zusammenhang zwischen der Gestaltung eines Produkts und dessen Fähigkeit zur Funktionserfüllung in vorausgedachten Anwendungssituationen hervor. Für die Konstruktion ergibt sich daraus die Forderung, dass die Gestalt der beteiligten Interaktionspartner so aufeinander abgestimmt werden muss²⁰⁹, dass die technischen Anforderungen an ein Produkt in der gewünschten Qualität realisiert werden können.

In der Mechanik wird unter dem Gestaltbegriff die Gesamtheit aller funktionsrelevanten Wirkorte verstanden, die jeweils durch ihre Anordnung und ihre geometrischen und stofflichen Eigenschaften charakterisiert sind.²¹⁰ Aus z. B. Kosten- oder fertigungstechnischen Gründen lässt sich die Produktgestalt beim Konstruieren jedoch nicht immer nur auf die Komposition der funktionsrelevanten Wirkorte beschränken – oftmals müssen auch funktionslose Strukturen in Kauf genommen werden, die als Begrenzungsflächen oder Reststrukturen bezeichnet werden.²¹¹ Bei der Entwicklung elektronischer Teilsysteme steht neben der physischen ebenso die logisch-funktionale Struktur im Zentrum des Gestaltbegriffs. Übertragen auf die Softwaretechnik kann der Gestaltbegriff im abstrahierten Sinne auch als eine Komposition logisch-funktionaler Programmstrukturen verstanden werden.²¹² Damit kann der Gestaltbegriff als ein Sammelbegriff für die strukturelle Komposition und die Beschaffenheit der Komponenten und Teilsysteme, die ein technisches Produkt bilden, angesehen werden.²¹³

Im Kontext der Konstruktion mechanischer Teilsysteme soll in der vorliegenden Arbeit soll der Gestaltbegriff wie folgt verwendet werden:

Definition 2-4: Gestalt (engl.: physical structure)

Die Gestalt bezeichnet die Komposition der funktionsrelevanten Wirkorte²¹⁴ sowie der nicht funktionsrelevanten Begrenzungsflächen und Reststrukturen eines Produkts.²¹⁵

Relation: Sie ist durch deren Anordnung und deren geometrische und stoffliche Eigenschaften charakterisiert.²¹⁶

Wichtiger Bestandteil einer funktionsgerechten Gestaltung ist die Berücksichtigung unerwünschter Wirkungen bei der Konzipierung und Ausgestaltung einer technischen

²⁰⁹ vgl. „Technische Kompositionslehre“ nach Kesselring 1954, vgl. Tschochner 1954

²¹⁰ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51

²¹¹ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002 S.51

²¹² vgl. Albers 2009a, Enkler 2010 S.64

²¹³ vgl. Hansen 1976, Sperlich 1983 S.9ff.

²¹⁴ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51, vgl. Ehrlenspiel 2005 S.441

²¹⁵ vgl. Matthiesen 2002 S.51

²¹⁶ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51

Lösung, sodass Störungen und ein Fehlverhalten in der Anwendung eines Produkts vermieden werden. Grundlage für eine präventive Fehlervermeidung in der Konstruktion ist die Entwicklung eines robusten Produktkonzepts, das sich nicht nur durch eine Fehlervermeidung, sondern auch durch eine minimale Fehlerauswirkung auszeichnet.²¹⁷ Gemäß dem Zusammenhang von Gestalt, Wirkung und Verhalten werden folgende Definitionen für die vorliegende Arbeit übernommen:

Definition 2-5: Verhalten (engl.: behaviour)

Unter dem Verhalten eines technischen Produkts oder eines Teilsystems wird in der vorliegenden Arbeit dessen Reaktion auf äußere Einflüsse (Kraft, Energie, Stoff, Information) verstanden, die durch Interaktionen mit Umgebungssystemen induziert werden.²¹⁸ Es beschreibt, auf welche Weise eine Funktion erfüllt wird.²¹⁹

Relation: Das Verhalten eines Systems ergibt sich aus der Gesamtheit seiner Wirkungen bzw. Wechselwirkungen zwischen seinen Komponenten, Teilsystemen und mit der Umgebung. Unerwünschte Wirkungen können zu unerwünschtem Verhalten („Fehlfunktion“, „Fehlverhalten“ oder Versagen) führen.

Beispiel: Das Abbremsen eines Fahrzeugs bei Betätigung der Bremse kann als gewünschtes Verhalten beobachtet werden, das aus einer Summe mehrerer Wirkungen resultiert. Rasseln (Getriebe) und Rupfen (Kupplung), aber auch Verschleiß, Korrosion, Knicken, Ermüdung, Verformung, Bruch etc. stellt hingegen ein meist unerwünschtes Verhalten dar, das sich aus mehreren unerwünschten Wechselwirkungen ergibt.

2.3.2 Bedeutung von Funktion und Gestalt beim Konstruieren

Die Bedeutung der Beschreibung von Funktionen bezieht sich in der Entwicklungsmethodik vor allem auf die Strukturierung und Abstrahierung von Anforderungen und Problemsituationen. Besonders in klassischen konstruktionswissenschaftlichen Arbeiten wird empfohlen, *Funktionsstrukturen* zu erstellen (vgl. Abbildung 2.5),²²⁰ um die Komplexität eines Konstruktionsproblems durch Zerlegen in Teilprobleme besser handhabbar zu machen und sich von Vorfixierungen zu lösen.²²¹ In nachfolgenden Konstruktionsschritten können Konstrukteure Anregungen beispielsweise aus Konstruktionskatalogen nutzen und das Prinzip „Variation der

²¹⁷ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.665f.

²¹⁸ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002 S.53, Albers 2014a

²¹⁹ vgl. Paetzold 2006

²²⁰ vgl. Roth 1992, Koller 1994, Pahl & Beitz 2005

²²¹ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.49

Gestalt“ anwenden,²²² indem sie die geometrischen und stofflichen Eigenschaften und Relativbewegungen einer Referenzlösung variieren.

Den iterativen Charakter des Konstruierens beschreibt auch SUH in der Axiomatic Design Theory.²²³ Ein Konstruktionsprozess verläuft demnach im stetigen Wechsel zwischen Funktions- und Gestaltmodellierung („zig-zagging“), weil mit zunehmendem Reifegrad einer Lösung immer mehr Abhängigkeiten zwischen Anforderungen an die Funktion und die Gestalt eines technischen Systems, z. B. durch den Einfluss bereits festgelegter Teillösungen auf den verbleibenden Lösungsraum, entstehen.

Kritik an dieser theoretisch-präskriptiven Vorgehensbeschreibung äußern u. a. ALBERS, BIRKHOFFER und BADKE-SCHAUB, die darin eine mangelnde Anpassung an reale Arbeitsabläufe in der Konstruktion und an die tatsächlichen Bedürfnisse der Praxis der Produktentwicklung sehen.²²⁴ Auch LINDEMANN sieht die Bedeutung der Modellierung von Funktionsstrukturen nicht vorwiegend in der Generierung neuer Lösungen, sondern in der intensiven Beschäftigung mit dem Produkt: *„Funktionsstrukturen regen nur das Nachdenken über ein technisches System an.“*²²⁵ Dementsprechend sei *„nicht das Ergebnis der Funktionsanalyse, d. h. die Funktionsstruktur entscheidend, sondern der Prozess der Abstraktion und Strukturierung, der durch die intensive Beschäftigung mit dessen Zweck zu einem tieferen Verständnis des Produkts führt.“*²²⁶ ALBERS und ECKERT merken an, dass erst dieses Produktverständnis zu innovativen Lösungen im SCHUMPETER’schen Sinne führen könne.²²⁷

ALBERS und MATTHIESEN stellen darüber hinaus fest, dass in Funktionsstrukturen der Bezug zur Produktgestalt *„und zur Umgebung, die die Funktion gemeinsam erfüllen“*, fehlt.²²⁸ In der Industrie sei zu beobachten, dass *„die meisten Konstrukteure Funktionsstrukturen kennen und diese auch als sinnvoll und gewinnbringend einschätzen“*; die von ihnen dokumentierten Funktionen seien jedoch häufig *„wenig eindeutig und nicht mit der Gestaltdokumentation verknüpft“*.²²⁹

Auch WEBER bestätigt, dass *„die logisch-funktionalen Kopplungen/Verbindungen der Elemente“* in 3D-Produktmodellen und technischen Zeichnungen *„traditionell nicht explizit dargestellt“* werden.²³⁰ Aus den gängigen Konstruktionsunterlagen (siehe z. B. Abbildung 2.6) sei meist nicht eindeutig ersichtlich, wo die Wirkflächen der

²²² vgl. Ehrlenspiel 2009 S.446ff.; Pahl & Beitz 2005 S.75f.

²²³ vgl. Suh 1998

²²⁴ vgl. Albers 2002, Geis 2008, Albers 2015a

²²⁵ Lindemann 2001

²²⁶ Pulm 2004 S.103

²²⁷ vgl. Schumpeter 1961, Albers 2002, Eckert 2010, Albers 2014a

²²⁸ Albers 2002, Matthiesen 2011

²²⁹ Matthiesen 2011, vgl. Albers 2002, Albers 2008a, Albers 2014a

²³⁰ vgl. Weber 2012

Komponenten liegen und in welcher Weise die definierten Gestalteigenschaften zur Erfüllung von Leistungs- und Qualitätsanforderungen beitragen. Dieser Mangel führe „zu Problemen und Ineffizienz. Bei jeder Diskussion der Gestalt muss der Grund für die Gestalt, der Zusammenhang mit der Funktion, neu durchdacht werden“.²³¹

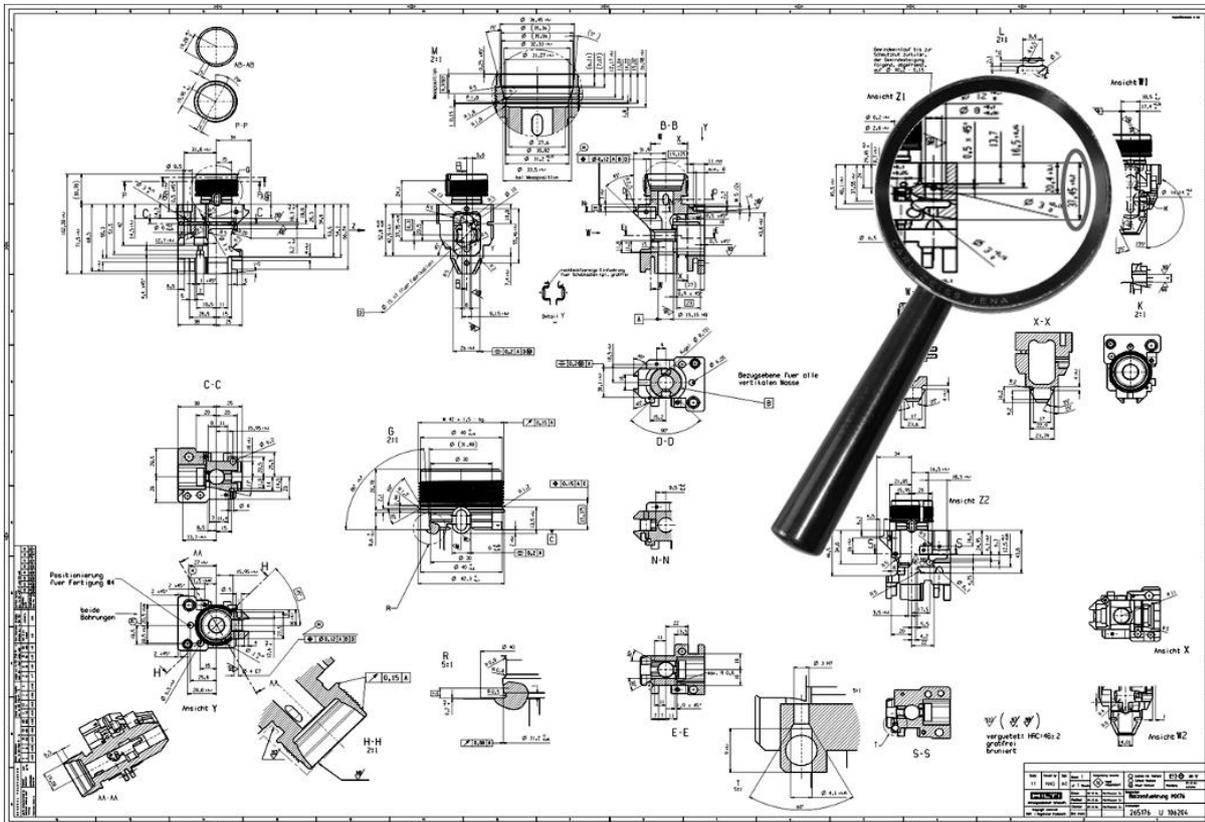


Abbildung 2.6: Technische Zeichnung von Komponenten eines Gerätes nach MATTHIESEN²³¹

Bezogen auf die praktische Methodenanwendung betont auch HACKER die Problematik der Trennung von Funktion und Gestalt. Er beschreibt Konstruieren als das „Vorausdenken von Strukturen, die Funktionen realisieren müssen. Gebilde müssen also laufend in Funktionen und Funktionen wieder in Gebilde, die sie realisieren, übersetzt werden“.²³² Die mentale Leistung kreativer Produktentwickler liegt demnach v. a. in der stetigen Überführung verschiedenartiger Modelle, die sich einerseits mit abstrakten Funktionsbeschreibungen, andererseits mit konkreten Gestaltdarstellungen befassen. Das Problem beim Konstruieren besteht somit nicht nur „aus der Anforderung, neue Lösungen zu generieren. [...] Die besondere Denkleistung besteht [vielmehr] darin, einen ständigen Wechsel im Denkprozess zwischen [physischen] Strukturen und [abstrakten] Funktionen zu bewältigen“.²³³

²³¹ Matthiesen 2011

²³² Hacker 2002

²³³ Hacker 2002

Bei Untersuchungen zu Denk- und Handlungsabläufen beim Konstruieren konnte festgestellt werden, dass Konstrukteure dazu neigen, vorwiegend mit konkreten geometrischen Repräsentationen eines Produkts bzw. einer Lösung zu arbeiten.²³⁴ Funktionen werden dabei häufig implizit über Abbildungen der Gestalt beschrieben. Ergänzende Erläuterungen und die Benennung der dargestellten Bauteile geben einer entsprechend ausgebildeten Person Aufschluss darüber, wie die abgebildete Lösung funktionieren soll.

Im nachfolgenden Kapitel wird erläutert, dass die von Konstrukteuren bevorzugten, grafischen und geometrischen Repräsentationsformen²³⁵ nicht nur zur Darstellung der Produktgestalt, sondern auch zur Beschreibung von Funktion-Gestalt-Zusammenhängen geeignet sein können.

2.3.3 Grafische Modellbildung zum Lösen von Gestaltungsproblemen

Im vorangegangenen Kapitel wurde festgestellt, dass konkrete Darstellungsformen die Entwicklung von Lösungen für ein Gestaltungsproblem unterstützen.²³⁶ Charakteristisch für ein Gestaltungsproblem ist wiederum dessen Kausalität, d. h. dass die Ursache in der Gestalt und die Folge in der Funktion bzw. im Verhalten eines Produkts gesehen wird.²³⁷ In der Konstruktionspraxis ist jedoch eine Dokumentation von Funktion-Gestalt-Zusammenhängen aufgrund einer traditionellen Trennung von Modellen zur Funktions- und zur Gestaltbeschreibung²³⁸ eher unüblich. Verschiedene konstruktionsmethodische Arbeiten haben sich daher zum Ziel gesetzt, die davon ausgehende Problematik der mentalen Barrieren zwischen unterschiedlichen Abstraktionsebenen von Funktion und Gestalt durch neue Formen der Modellbildung zu überwinden.²³⁹ Ziel ist es, eine größere Flexibilität bei der Darstellung und Formulierung von Funktionen im Kontext der grafischen Gestaltbeschreibung zu ermöglichen, ohne das individuelle Verständnis des Funktionsbegriffs einzuschränken.²⁴⁰

Der Lösungsansatz, der dabei verfolgt wird, ist eine Zusammenfassung verschiedener Partialmodelle (Funktionsstrukturen, Wirk-Strukturen, Gestalt, etc.), bei der die jeweiligen Ausdrucksmittel (Tabellen, Grafiken, Symbole, Text) und deren Abstraktionsniveaus beibehalten und miteinander verknüpft werden.²⁴¹ ALBERS spricht auch von einer *vertikalen* (stufenlos im Abstraktionsgrad einstellbaren) und

²³⁴ vgl. Eckert 2010

²³⁵ vgl. Eckert 2010, Hannah 2011

²³⁶ vgl. Araujo 2001 S.161

²³⁷ vgl. Kapitel 2.3.1 oder exemplarisch Pahl & Beitz 2005 S.51

²³⁸ vgl. Weber 2012

²³⁹ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Erden 2008, Crilly 2008, Lemburg 2009

²⁴⁰ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Alink 2010, Eckert 2011, Thau 2013, Albers 2014a

²⁴¹ vgl. Albers 2014a

einer *horizontalen* (zeitlich über einen Produktentstehungsprozess verteilt nutzbaren) Durchgängigkeit verschiedener Modelle bzw. Repräsentationsformen.²⁴²

Eine wichtige Randbedingung für die Entwicklung einer solchen Modellierungstechnik ist die Verwendung einer möglichst schon konventionell etablierten Symbolik. LEMBURG stellt fest, dass die Verwendung von grafischen Symbolen neben dem Gebrauch von Schriftzeichen zur Repräsentation von Objekten von jeher üblich sei, und ergänzt: *„Für die symbolische Darstellung [...] ist eine hohe Präzision und Eindeutigkeit der Aussage erforderlich, weshalb für einzelne Disziplinen [...] strengere Konventionen in Form von Normen getroffen wurden. Allen diesen Konventionen ist gemeinsam, dass sie nur Symbole für ganze Objekte oder Teilprozesse festlegen, nicht aber die Gestalt eines Objekts aufbrechen“*²⁴³ und sie auf diese Weise einer detaillierten Beschreibung der funktionsrelevanten Wirkorte zugänglich machen.

Eine weitere grundsätzliche Problematik bei der Verwendung grafischer, insbesondere ikonischer und symbolischer Ausdrucksmittel sieht LEMBURG im Informationsverlust und einer möglichen Mehrdeutigkeit der dargestellten Sachverhalte, insbesondere in solchen Phasen der Konstruktion, in denen eine detaillierte Produktgestalt noch nicht bestimmt ist.²⁴⁴ Soll jedoch, beispielsweise bei einer Funktionsanalyse eines bestehenden Produkts, eine sehr konkrete geometrische Darstellungsform wie eine technische Zeichnung zur Beschreibung von Funktionen mit Bezug zur Produktgestalt gewählt werden, liegt das Problem wiederum im *„Unvermögen der Ausdrucksmittel technischer Zeichnungen, funktionale Zusammenhänge zu verdeutlichen“*.²⁴⁵ Je nach Abstraktionsniveau einer grafischen Darstellung bestehen demnach andere Probleme, die nach LEMBURG darin begründet liegen, dass es in der *„Palette der konventionell festgelegten Symbole der Funktionssynthese und der Zeichnungsnormung sowie den Ausdrucksmitteln der ikonischen Repräsentationen des technischen Zeichnens“*²⁴⁶ an stilistischen Möglichkeiten mangle, *„das zugrunde liegende Prinzip zu betonen. Technische Zeichnungen kommunizieren ausschließlich das Ergebnis des Gestaltungsprozesses“*,²⁴⁷ nicht jedoch die diesem Ergebnis zugrunde liegenden, beabsichtigten Funktionen eines Produkts.

Die Ausführungen von LEMBURG beschreiben eine Problematik, die in der Praxis ausschlaggebend sein kann für eine mangelhafte Verknüpfung funktionaler und

²⁴² vgl. Albers 2012a

²⁴³ Lemburg 2009 S.64

²⁴⁴ vgl. Lemburg 2009 S.67

²⁴⁵ Lemburg 2009 S.64

²⁴⁶ Lemburg 2009 S.64

²⁴⁷ Lemburg 2009 S.64

gestaltbezogener Produktinformationen in gemeinsamen Repräsentationen. ECKERT betont, dass im Verlauf eines Konstruktionsprozesses immer eine „*Mischung aus stark und wenig detaillierten Gestaltinformationen, sowie konkreten Produktdetails und abstrakten Anforderungen oder Funktionsbeschreibungen*“ vorliegt.²⁴⁸ „*Der Grund, warum sich Konstrukteure früh auf eine bestimmte Lösung festlegen, ist der Mangel an sog. „intermediate representations“ eines Produkts (zwischen abstrakten Funktions- und konkreten Gestalt-Beschreibungsformen).*“²⁴⁹

ALBERS und MATTHIESEN verwenden im *Contact and Channel Approach*²⁵⁰ eine Kombination von mehreren traditionellen Darstellungsformen auf verschiedenen Abstraktionsebenen, um den oben geschilderten Problemen zu begegnen. Sie verfolgen dabei das Ziel, grafische Produktmodelle, die klassischerweise auf die Beschreibung der Gestalt ausgerichtet sind, um Möglichkeiten zur Beschreibung von Funktionen zu erweitern. Funktionsbeschreibungen werden dazu im klassischen Stil textuell oder tabellarisch dargestellt, wohingegen gestaltbezogene Sachverhalte (wie im Konstruktionsumfeld üblich) in geometrisch-räumlichen Abbildungen des Konstruktionsgegenstands wiedergegeben werden. Zusätzlich werden die Modellelemente *Wirkflächenpaar (WFP)* und *Leitstützstruktur (LSS)* eingeführt, um diese beiden Abstraktionsebenen zu verbinden. Sie kennzeichnen in symbolischer Notationen die funktionsrelevanten Wirkorte, führen diese in *Wirk-Netze* und *Wirk-Strukturen* zusammen²⁵¹ und ermöglichen es dadurch, die Gestalt eines Produkts aufzubrechen und für eine detaillierte Beschreibung von Funktions-Gestalt-Zusammenhängen zugänglich zu machen (siehe Abbildung 2.7). In der Literatur werden sie daher teilweise auch als „Funktionsgestaltelemente“ bezeichnet.²⁵²

Gleichzeitig soll das Modellieren von Wirk-Strukturen dabei helfen, sich von der Idee der Funktionserfüllung einzelner Bauteile zu lösen. Sie unterstützt vielmehr die Analyse und Beschreibung, wie einzelne Bauteile „*in Bauteilstrukturen zusammenwirken und ermöglicht damit die Betrachtung von Wirkzusammenhängen [selbst] zu einem Zeitpunkt, zu dem noch keine vollständigen Teile vorhanden sind.*“²⁵³ Bei der Suche nach neuen gestalterischen Lösungen hingegen „*ermöglicht das Modell der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen vorerst die gedankliche Flexibilität, um die Gestalt während der Synthese variieren zu können.*“²⁵⁴

²⁴⁸ Eckert 2010

²⁴⁹ Eckert 2010

²⁵⁰ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002

²⁵¹ vgl. Albers 2014a

²⁵² Thau 2013 S.103

²⁵³ Lemburg 2009 S.67

²⁵⁴ Lemburg 2009 S.67

²⁵⁵ Serf 2013 S.25f. (Abschlussarbeit)

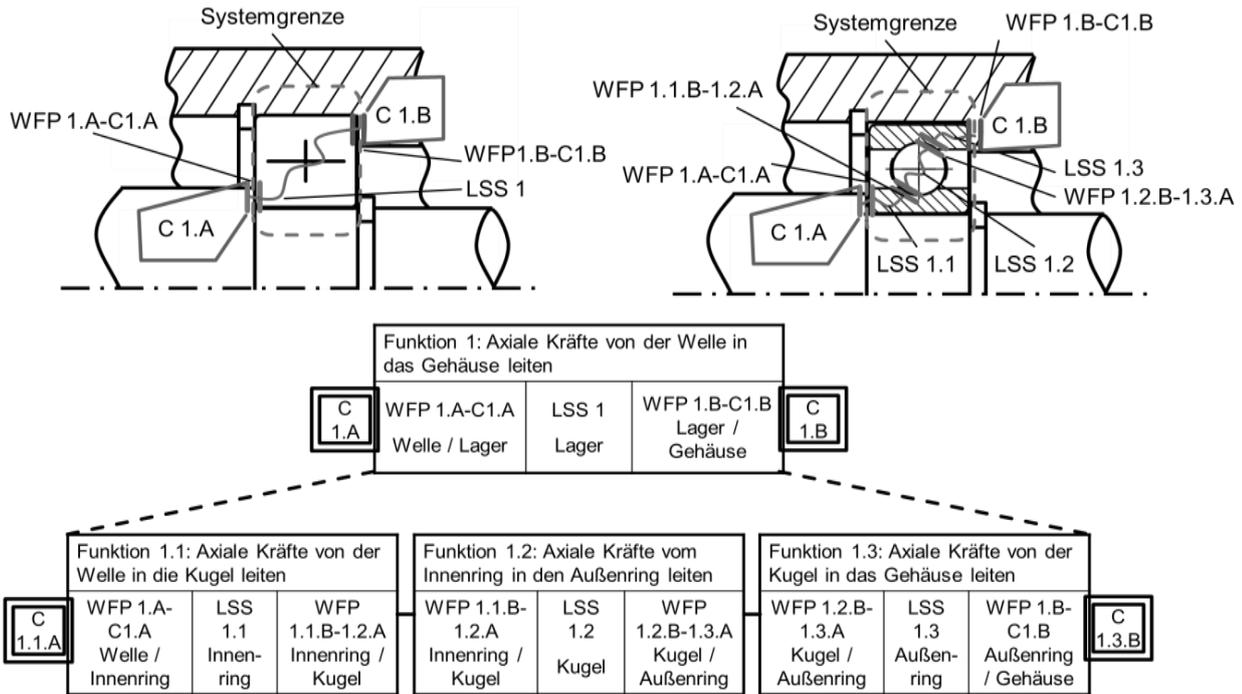


Abbildung 2.7: Contact and Channel Modell eines Wälzlagers zur Visualisierung funktionsrelevanter Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen auf zwei Detaillierungsebenen nach SERF²⁵⁵

ALBERS und MATTHIESEN verbinden mit dem Contact and Channel Approach (C&C²-A) die beiden Bedeutungsebenen der abstrakten Funktionsbeschreibung und der konkreten Gestaltbeschreibung (siehe Abbildung 2.8). Dadurch werden *Analyseschritte* von der konkreten Gestalt zur abstrakten Funktion ebenso unterstützt wie *Syntheseschritte*, bei denen Gestaltungsideen durch Variation, Hinzufügen oder Entfernen von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen gebildet werden.

Ein wesentlicher Bestandteil von Contact and Channel Modellen (C&C²-M) ist die Einbindung des betrachteten (Teil-)Systems in die System-Umgebung und damit in den Kontext der Anwendung. ALBERS verwendet dazu sogenannte *Connectoren*.²⁵⁶ Ein Connector wird an der Systemgrenze eines Modells mit den dort vorhandenen Wirkflächen verknüpft (Wirkflächenpaare werden gebildet). ALBERS definiert Connectoren als Modelle der zur Funktionserfüllung erforderlichen System-Umgebung, z. B. Eigenschaften des Asphalt und der Witterungsverhältnisse, die bei der Entwicklung von Autoreifen als funktionsbestimmende Einflussgrößen berücksichtigt werden müssen, die für Konstrukteure des Reifens aber nicht beeinflussbar sind.²⁵⁷ Je nachdem, welche Umgebungssysteme und Einflussgrößen durch Connectoren berücksichtigt werden, variiert auch der „Gültigkeitsbereich der

²⁵⁶ vgl. Albers 2014a

²⁵⁷ vgl. Albers 2014a

durch die jeweilige Analysemethode bzw. das Analysewerkzeug gewonnenen Aussage“.²⁵⁸

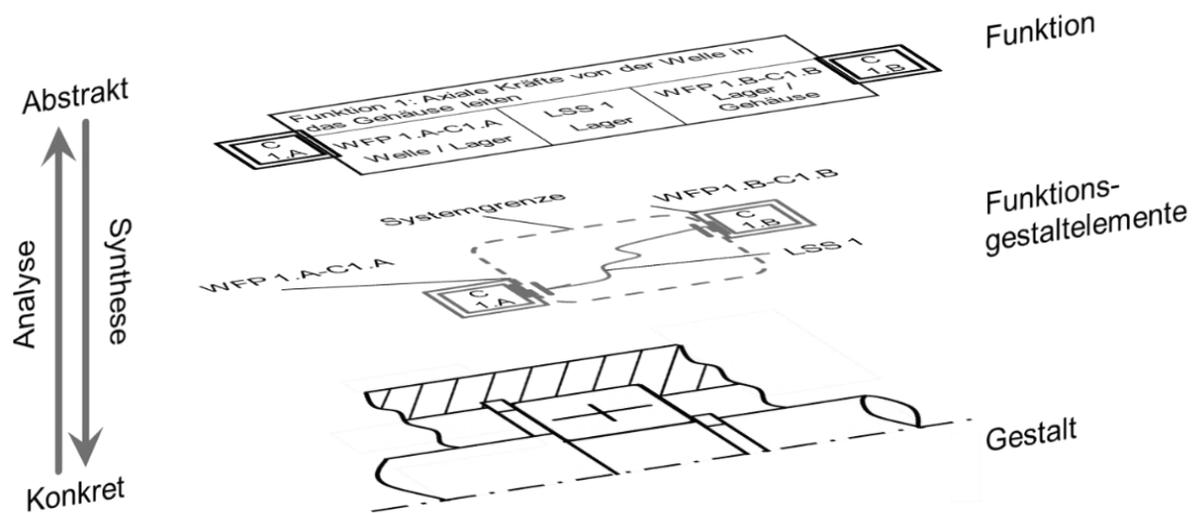


Abbildung 2.8: Ebenen eines Contact and Channel Modells eines Wälzlagers nach SERF²⁵⁹

Die Bedeutung des Connectors wird anschaulich in den Arbeiten von ALBERS et al. zum X-in-the-Loop (XiL) bzw. zum Test-based-Development (TbD) demonstriert.²⁶⁰ Unabhängig davon, ob einzelne Effekte in Wirkflächenpaaren, die Funktionen von Teilsystemen oder sogar das Verhalten des Gesamtsystems analysiert werden, bedarf es einer Einbindung in die Systemumwelt, um die technischen Vorgänge realistisch beschreiben zu können. Bei Verifikations- und Validierungsarbeiten in der Fahrzeugentwicklung werden durch Connectoren beispielsweise die Einflüsse und Wechselwirkungen der Umwelt, des Fahrers und der Straße durch numerische Modelle beschrieben und mit dem physischen Referenzprodukt, z. B. einem Kupplungssystem auf einem Prüfstand, verknüpft.²⁶¹

Im Fokus jüngerer Arbeiten von ALBERS steht – wie dieses Beispiel zeigt – nicht nur die Beschreibung mechanischer Zusammenhänge von Funktion und Gestalt, sondern auch die Entwicklung einer generalisierten Systematik für die Funktionsanalyse und -Optimierung mechatronischer Systeme. Dazu werden die ursprünglich für die Modellbildung in der Mechanik eingeführten Modellelemente *Wirkflächenpaar* und *Leitstützstruktur* nicht nur zur Beschreibung der funktionsrelevanten physischen Wirkorte verwendet (z. B. mechanische

²⁵⁸ vgl. Weber 2012

²⁵⁹ Serf 2013 S.23 (Abschlussarbeit)

²⁶⁰ vgl. Albers 2008, Albers 2015a

²⁶¹ vgl. Albers 2008, Düser 2010

Wirkprinzipien),²⁶² sondern im abstrahierten Sinne auch zur Kennzeichnung der in der Elektronik und Software-Entwicklung relevanten, logisch-funktionalen Schnittstellen bzw. der Strukturen zwischen diesen Schnittstellen (z. B. elektronische Schaltungen, Schnittstellen von Software etc.).²⁶³

Ausgehend von dieser qualitativen Form der Modellbildung werden in den Arbeiten von ALBERS, MATTHIESEN, OHMER, THAU und WIEDNER Heuristiken formuliert und Empfehlungen ausgesprochen, wie *Contact and Channel Modelle* gebildet und für Analyse- und Syntheszwecke genutzt werden können.²⁶⁴ Sie sollen Anwender bei der Bildung von Hypothesen unterstützen, die Zusammenhänge zwischen beobachteten Funktionen und der Beschaffenheit der Produktgestalt herstellen.²⁶⁵ Für eine umfassende Übersicht zu diesen Empfehlungen wird auf aktuelle Publikationen z. B. von ALBERS und THAU verwiesen.²⁶⁶

ALBERS und MATTHIESEN fassen mit dem *Contact and Channel Approach (C&C²-A)* die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten zusammen, die speziell auf Analyse- und Syntheseschritte zum Lösen von Gestaltungsproblemen in der Produktgenerationsentwicklung ausgerichtet sind.

Im Rahmen von *Analysertätigkeiten* ermöglicht der *Contact and Channel Approach (C&C²-A)* sowohl eine theoretisch fundierte, kausale Argumentation als auch eine darstellende Repräsentation des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt bis auf die Ebene der Wirkorte einzelner Maschinenelemente (mithilfe von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen). Die vorwiegend qualitative Form der Modellbildung kommt den Denk- und Handlungsmustern von Konstrukteuren²⁶⁷ besonders entgegen, da anhand einer einfachen, darstellenden Modellbildung und mit vergleichsweise wenig Aufwand, d. h. ohne Berechnungen oder aufwendigen Auswahlverfahren, ein umfangreiches *qualitatives Systemverständnis* erreicht werden kann.²⁶⁸ Häufig können davon ausgehend bereits erste Ideen zur Gestaltvariation durch intuitiv-assoziatives Denken entwickelt werden.

Sofern Gestaltungsideen möglichst gezielt und kausal begründet entwickelt werden sollen, ist es notwendig, zusätzlich über ein vertieftes, *quantitatives Systemverständnis* zum Zusammenhang der Beschaffenheit der Wirkorte und der

²⁶² vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002

²⁶³ vgl. Enkler 2010 S.64, vgl. Albers 2014a

²⁶⁴ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Ohmer 2008, Thau 2013, Wiedner 2013, Albers 2014a

²⁶⁵ vgl. Thau 2013 S.27

²⁶⁶ vgl. Thau 2013, vgl. Albers 2014a S.161ff.

²⁶⁷ vgl. Kapitel 2.1.3: „Zerlegung eines Gesamtproblems in Teilprobleme“ und „Unterstützung der „Aufwands- und Zeitminimierung“

²⁶⁸ vgl. Wiedner 2013 S.164, vgl. Thau 2013 S.20f. & S.135

Qualität der Funktionserfüllung zu verfügen.²⁶⁹ Hierfür sind jedoch quantitative Analyseformen erforderlich,²⁷⁰ die in Kapitel 2.5 vorgestellt werden.

Für eine *deduktive* Synthese von Gestaltungsideen sehen ALBERS, MATTHIESEN und OHMER drei mögliche Strategien: die Eigenschaften der funktionsrelevanten Wirkorte zu variieren, neue Wirkflächenpaare einzuführen oder bestehende aufzuheben.²⁷¹ Die von LEMBURG beschriebenen *Schritte zur Gestaltsynthese*²⁷² zeigen beispielhaft, wie diese Strategien eine assoziative Gestaltvariation unterstützen können. Eine Anleitung zur deduktiven Gestaltvariation ist in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur hingegen noch nicht verfügbar.

2.3.4 Zwischenfazit

Dem Funktionsbegriff kommt eine zentrale Rolle für die Konstruktion technischer Produkte zu. Unternehmen definieren über die möglichen Funktionen und über die Qualität der Funktionserfüllung den Marktwert ihrer Produkte.²⁷³ Aus der Perspektive eines Konstrukteurs ist es daher besonders wichtig, die Zusammenhänge zwischen der konstruktiven Gestaltung der Komponenten bzw. Teilsysteme eines technischen Produkts und den daraus resultierenden Funktionen (hier im Sinne des erwarteten bzw. tatsächlichen Verhaltens) zu kennen und beschreiben zu können. Eine solche Beschreibung hängt maßgeblich vom Bedeutungs-Zusammenhang der direkt beeinflussbaren Gestalt und den sich daraus ergebenden Produktfunktionen ab. Trotz der ambivalenten Bedeutung des Funktionsbegriffs²⁷⁴ kann über die Begriffe *Verhalten*, *Wirkung* und *Wirkprinzip* eine kausale Beziehung zur *Gestalt* eines technischen Systems aufgezeigt werden. Funktionen sind beim Konstruieren die wichtigsten Zielgrößen und die Dokumentation einer dazu korrespondierenden Produktgestalt z. B. in 3D-Modellen und technischen Zeichnungen ist das wichtigste Ergebnis der Konstruktion.²⁷⁵

Dieser kausale Zusammenhang zwischen Funktion und Gestalt bildet die Grundlage für eine Reihe konstruktionsmethodischer Arbeiten, die je nach Anwendungssituation verschiedene Vorgehenssystematiken vorschlagen, um für eine gewünschte Funktion eine geeignete Gestalt zu entwickeln. Klassische Ansätze²⁷⁶ der Entwicklungsmethodik empfehlen zum Zweck der kreativen Suche neuer Lösungen zunächst eine Modellierung lösungsneutraler Funktionsstrukturen, die in iterativen

²⁶⁹ vgl. Matthiesen 2002 S.54

²⁷⁰ vgl. Thau 2013 S.133ff.

²⁷¹ vgl. Matthiesen 2002 S.71, Albers 2004, Ohmer 2008 S.37ff.

²⁷² vgl. Lemburg 2009 S.84ff.

²⁷³ vgl. Pfeifer 2001 S.XXV, vgl. Crosby 1986 S.69, S.72

²⁷⁴ vgl. Erden 2008, Vermaas 2010, Alink 2010

²⁷⁵ vgl. Matthiesen 2011

²⁷⁶ vgl. Roth 1992, Koller 1994, Pahl & Beitz 2005

Analyse- und Syntheseschritten in Wirk-Strukturen und schließlich in eine detaillierte Produktgestalt überführt werden soll.

Andere Ansätze, die sich stärker auf Anpassungs- und Variantenkonstruktionen²⁷⁷ oder die Produktgenerationsentwicklung²⁷⁸ beziehen, empfehlen eine möglichst konkrete Repräsentation der Wirkzusammenhänge und eine daraus abgeleitete, induktiv-deduktive Lösungsentwicklung.

In beiden Fällen spielt die Repräsentation des Konstruktionsgegenstands eine wichtige Rolle. Konstrukteure denken und handeln vorwiegend in darstellenden Repräsentationsformen und haben einen starken Bezug zu geometrisch-räumlichen Modellen des zu entwickelnden Produkts und seiner Komponenten.²⁷⁹ Dabei wird leicht übersehen, dass einzelne Bauteile eine Funktion niemals allein, sondern nur in Interaktion mit ihrer unmittelbaren Systemumgebung erfüllen können.²⁸⁰ Dieser Zusammenhang wird bei der Dokumentation der Gestalt eines Produkts in technischen Zeichnungen und 3D-CAD-Modellen nur implizit, z. B. über Toleranzen, dargestellt.²⁸¹ Die funktionale Begründung, warum eine Produktgestalt so wie dort abgebildet gewählt wurde, erfolgt – wenn überhaupt – nur in separaten Dokumenten. Dies kann in der Praxis leicht zu Ineffizienz und Fehlern führen.²⁸² Die besondere Leistung von Konstrukteuren besteht damit nicht nur in der kreativen Lösungsentwicklung, sondern auch im permanent wechselnden Vorausschauen und Reflektieren zwischen den Abstraktionsniveaus der Funktions- und der Gestaltbeschreibung.²⁸³

ALBERS und MATTHIESEN haben sich daher zum Ziel gesetzt, mit einer darstellenden Modellbildung von Funktion-Gestalt-Zusammenhängen die Problematik der Trennung dieser traditionell verschiedenartigen Dokumentationsformen zu überwinden. Sie beschreiben mit dem *Contact and Channel Approach (C&C²-A)*²⁸⁴ eine qualitative Form der Modellbildung, bei der eine grafisch dargestellte Produktgestalt über die Modellelemente *Wirkflächenpaar*, *Leitstützstruktur* und *Connector* mit textuellen Funktionsbeschreibungen verbunden werden. Die Modellbildung dient dadurch als Leitfaden zur Vertiefung und Dokumentation des individuellen Systemverständnisses beim Lösen von Gestaltungsproblemen.

Von einer durchgängigen Konstruktionssystematik, die sowohl qualitative als auch quantitative Analyse- und Syntheseschritte unterstützt, kann jedoch noch nicht

²⁷⁷ vgl. Lindemann 2001, Pulm 2004, Geis 2008, Lemburg 2009

²⁷⁸ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Albers 2015a

²⁷⁹ vgl. Eckert 2010

²⁸⁰ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002

²⁸¹ vgl. Lemburg 2009 S.64, Matthiesen 2011

²⁸² vgl. Matthiesen 2011

²⁸³ vgl. Hacker 2002

²⁸⁴ vgl. Albers 2014a

gesprochen werden. Eine gezielte Ergänzung des *Contact and Channel Approach* mit entwicklungsmethodischen Erkenntnissen aus Forschungsarbeiten zu Produkteigenschaften (Kapitel 2.4) und der Analyse von Wirkzusammenhängen (Kapitel 2.5) birgt Potenzial für weiterführende Arbeiten in diesem Bereich.

2.4 Eigenschaften und Merkmale technischer Systeme

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert wird der Verhaltensbegriff ergänzend oder häufig sogar synonym zum Funktionsbegriff verwendet. WANKE merkt dazu an: „Das Produktverhalten umfasst jedoch wesentlich mehr als nur die gewünschte Funktion, sodass die Funktionserfüllung nur ein Bestandteil des gesamten Produktverhaltens ist.“²⁸⁵ So sind die Eigenschaften „leise“ und „vibrationsarm“ keine Funktionen, „ermöglichen aber auch eine Aussage darüber, wie sich ein Produkt im Betrieb verhält.“²⁸⁶ Das Produktverhalten zeichne sich vielmehr „dadurch aus, dass es [...] sich nicht nur auf die Funktionen beschränkt.“²⁸⁷ Beim Konstruieren sollte der Fokus daher nicht nur auf den Funktionen im Sinne des beabsichtigten Zwecks eines Produkts, sondern ebenso auf dessen Eigenschaften liegen. Beim Gestalten müssen die Produkteigenschaften so ausgelegt werden, dass eine Funktionserfüllung unter den tatsächlich auftretenden Randbedingungen wie beabsichtigt möglich ist.²⁸⁸

Die Bedeutung von Produkteigenschaften wird vor dem Hintergrund deutlich, dass ungewolltes und unvorhergesehenes Produktverhalten oft ein hohes Risiko darstellt. Daher werden Methoden und Werkzeuge entwickelt und angewendet (z. B. QFD,²⁸⁹ FMEA,²⁹⁰ XiL,²⁹¹ Simulationen etc.), die eine Abschätzung, Vorhersage und Absicherung der wichtigsten Produkteigenschaften möglichst frühzeitig ermöglichen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Ansätze zur Beschreibung von Wirk-Strukturen beschreiben zwar explizit den (qualitativen) Zusammenhang zwischen Funktion und Gestalt, nicht aber die (quantitativen) Beziehungen zu funktionsbestimmenden Eigenschaften eines Produkts. In der nachfolgend diskutierten Literatur wie auch im Ergebnisteil dieser Arbeit wird deutlich, dass durch Berücksichtigung der Forschungsarbeiten zu Produkteigenschaften neue Erkenntnisse und damit die (Weiter-)Entwicklung etablierter Konstruktionsmethoden und -Prozessen zur Unterstützung der Produktgenerationsentwicklung möglich sind.

²⁸⁵ Wanke 2010

²⁸⁶ Wanke 2010

²⁸⁷ Wanke 2010

²⁸⁸ vgl. Roozenburg 2002

²⁸⁹ vgl. Akao 1992

²⁹⁰ vgl. Pfeiffer 2001 S.392ff.

²⁹¹ vgl. Albers 2008b, Düser 2010

2.4.1 Definitionen und Perspektiven der Begriffsverwendung

Eine zunehmende Anzahl und Vielfalt konstruktionswissenschaftlicher Arbeiten setzt sich mit den Begriffen *Merkmal* und *Eigenschaft* auseinander. Wie schon beim Funktionsbegriff gezeigt, führt die pluralistische Diskussionskultur dazu, dass auch für diese beiden Begriffe keine eindeutige Definition gegeben werden kann. Ein einheitliches Verständnis liegt nur insofern vor, als dass darunter meist alle Charakteristika verstanden werden, die einem technischen System zu eigen sind und dieses im Besonderen kennzeichnen.²⁹²

Für die in Kapitel 5 beschriebene Modellierung von Wirkzusammenhängen ist diese Definition zwar eine notwendige, aber keine hinreichend detaillierte Beschreibung. Im Folgenden werden daher die verschiedenen in der Literatur diskutierten Perspektiven und Definitionen wiedergegeben sowie Ansätze zur Klassifikation und zur Modellierung vorgestellt. Ziel dieser Ausführungen ist es, ein grundsätzliches Verständnis für die aus unterschiedlichen Perspektiven verwendeten Begriffe zu erarbeiten und begründete Begriffsdefinitionen für die vorliegende Arbeit festzulegen.

Geleitet von der Auffassung, dass Maschinensysteme (= Produkte) die „*Träger der Funktion*“ und „*das Wichtigste am Maschinensystem die gewünschten Eigenschaften sind*“,²⁹³ entwickelte HUBKA bereits 1984 eine Theorie zur Beschreibung technischer Systeme auf Grundlage ihrer Eigenschaften. Dabei ging er von der folgenden Begriffsdefinition für mechanische Produkte aus: Eine „*Eigenschaft ist [...] jedes Merkmal, das einem beliebigen Objekt eigen ist und das dieses Objekt charakterisiert*“.²⁹⁴ Darüber hinaus unterscheidet er zwischen externen Eigenschaften, die „*nicht unmittelbar beim Konstruieren festgelegt werden können*“,²⁹⁵ und internen Eigenschaften wie grundlegenden Wirkprinzipien, Geometrie, Toleranzen, Oberflächenbeschaffenheiten, Produktionsparameter etc.²⁹⁶ Jeder Eigenschaft könne zudem eine quantifizierbare Ausprägung zugeordnet werden. Den Merkmalbegriff definiert HUBKA in diesem Zusammenhang nicht. Dafür betont er verschiedene Möglichkeiten, Produkteigenschaften zu unterscheiden – je nach Perspektive, die in der Produktentstehung eingenommen wird:²⁹⁷

- **Art der Kausalbeziehung:** Eigenschaften werden je nachdem unterschieden, ob sie eine *Ursache* oder eine *Wirkung* beschreiben.
- **Art der Abhängigkeit:** Eigenschaften werden danach differenziert, ob sie *abhängig* oder *unabhängig* veränderlich sind.

²⁹² vgl. DIN 2330

²⁹³ Hubka 1984

²⁹⁴ Hubka 1984

²⁹⁵ Hubka 2002

²⁹⁶ vgl. Hubka 2002

²⁹⁷ vgl. Hubka 1984

- **Art der Bedeutung:** Hier werden *unentbehrliche, sehr wichtige, wichtige, weniger wichtige* sowie *unbedeutende* Eigenschaften unterschieden.
- **Gebiete:** *Geometrische, kinematische, mechanische, thermische, elektrische* und *magnetische, optische, akustische* und *chemische* Eigenschaften.
- **Perspektive in der Produktentstehung:** Eigenschaften werden unterschieden nach (1) *Wirkung* und *Funktion*: welche Handlungen werden ausgeführt, welche Fähigkeiten besitzt das Produkt, (2) *wirkungsbedingte* und *funktionsbedingte* Eigenschaften: Welche Bedingungen sind zur Funktionserfüllung nötig, (3) *Betriebseigenschaften*: Zuverlässigkeit, Lebensdauer etc., (4) *Ergonomie*: Die Bedienung betreffend, (5) *Aussehen*: Äußeres Erscheinungsbild, (6) *Distribution*: Transport, Verpackung, Versandt, Lagerung, (7) *Lieferung* und *Planung*: Losgröße, Lieferbarkeit etc., (8) *Gesetze*: Vorschriften, Normen und Standards entsprechend, (9) *Produktion*: Fertigbarkeit und Montagegerechtigkeit, (10) *Konstruktion*: Struktur, Gestalt, Abmessungen, Werkstoff, Oberfläche, Toleranzen, Herstellungsart, Konstruktionsmerkmale, (11) *Kosten* in Herstellung, Vertrieb, Betrieb etc., (12) die *Herstellung* betreffend.

HUBKA gibt mit dieser Ausführung einen umfassenden Überblick über verschiedene Arten von Produkteigenschaften und spiegelt damit das pluralistische Begriffsverständnis der Literatur ebenso wie das der Produktentwicklungspraxis wieder. Ein einheitliches oder gar formalisiertes Begriffsverständnis wurde bis heute nicht erreicht, wie die nachfolgenden Ausführungen anderer Autoren zeigen.

Auf ähnliche Weise wie HUBKA definiert EHRENSPIEL den Eigenschaftsbegriff als etwas, das durch Beobachtung oder Messung festgestellt werden kann.²⁹⁸ Darüber hinaus schlägt er vor, den Merkmalbegriff zu verwenden, wenn von einer besonders wichtigen, kennzeichnenden Eigenschaft die Rede sei.²⁹⁹ Der DUDEN schließt sich diesem Verständnis an und definiert eine Eigenschaft zunächst als eine „*zum Wesen einer [...] Sache [gehörende] (persönliche, charakterliche) Eigentümlichkeit*“.³⁰⁰ Durch Verwendung von Eigenschaftsbegriffen könne synonym die Beschaffenheit einer Sache zum Ausdruck gebracht werden. Ein Merkmal hingegen beschreibe ein besonders „*charakteristisches, unterscheidendes Zeichen, an dem eine bestimmte [...] Sache, auch ein Zustand erkennbar wird*“.³⁰¹

Die oben genannten Quellen verstehen ein Merkmal demnach als eine besondere Eigenschaft, wodurch eine Differenzierung z. B. aufgrund einer auffälligen

²⁹⁸ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.28

²⁹⁹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.28

³⁰⁰ <http://www.duden.de/rechtschreibung/Eigenschaft>, 21.12.2013, 16:00 Uhr

³⁰¹ <http://www.duden.de/rechtschreibung/Merkmal>, 21.12.2013, 16:00 Uhr

Ausprägung von anderen, gleichen oder ähnlichen Objekten möglich ist. Als Beispiel gibt der DUDEN „*die technischen Merkmale eines Fahrzeugs*“³⁰² an. Sie ermöglichen eine Unterscheidung von anderen Fahrzeugen und damit z. B. auch die Beschreibung unterschiedlicher Fahrzeugtypen.

LINDEMANN³⁰³ und EHRENSPIEL³⁰⁴ verwenden sowohl den Merkmal- als auch den Eigenschaftsbegriff zur Beschreibung der Beschaffenheit (1), der Funktionserfüllung (2) und der Relationen (3) eines technischen Produkts zu seiner Umgebung (siehe Abbildung 2.9). LINDEMANN geht dabei ebenso wie BIRKHOFFER davon aus, dass ein Eigenschaftsbegriff (z. B. Kantenlänge = 5mm) aus einem Merkmalbegriff (Kantenlänge), der die Bedeutung festlegt, und einer Ausprägung (z. B. 5mm) gebildet wird.³⁰⁵ Diese Definition weicht von dem oben genannten Verständnis ab, indem ein Merkmal keine besondere Eigenschaft, sondern lediglich seine qualitative Beschreibungsform darstellt. Die Autoren stellen fest, dass jedes Merkmal in eine der drei Kategorien eingeordnet werden kann. Sie unterscheiden damit der DIN 2330³⁰⁶ folgend zwischen solchen Größen, die eine funktionale Beschreibung eines Produkts ermöglichen, und jenen, die sich auf dessen Gestalt beziehen:

- **Beschaffenheitsmerkmale**, die vom Konstrukteur unmittelbar festgelegt werden und „*die am Produkt selbst festgestellt werden können (z. B. Gestalt, Werkstoff, Farbe, Verbindungsart). Auf diese Merkmale lassen sich alle Eigenschaften (also auch die nachfolgend aufgeführten Funktions- und Relationsmerkmale) zurückführen*“.³⁰⁷
- **Funktionsmerkmale**, die den gewollten Zweck eines Produkts bezeichnen, jedoch nur mittelbar festgelegt werden können.³⁰⁸
- **Relationsmerkmale**, die „*die erst in Zusammenhang mit anderen Systemen (oder dem Menschen) von Bedeutung sind*“.³⁰⁹

Funktions- und Relationsmerkmale bezeichnet EHRENSPIEL auch als Zustandsmerkmale, „*die den Zustand eines Objekts kennzeichnen*“.³¹⁰

³⁰² <http://www.duden.de/rechtschreibung/Merkmal>, 21.12.2013, 16:00 Uhr

³⁰³ vgl. Lindemann 2009a S.160

³⁰⁴ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.28f.

³⁰⁵ vgl. Birkhofer 1980

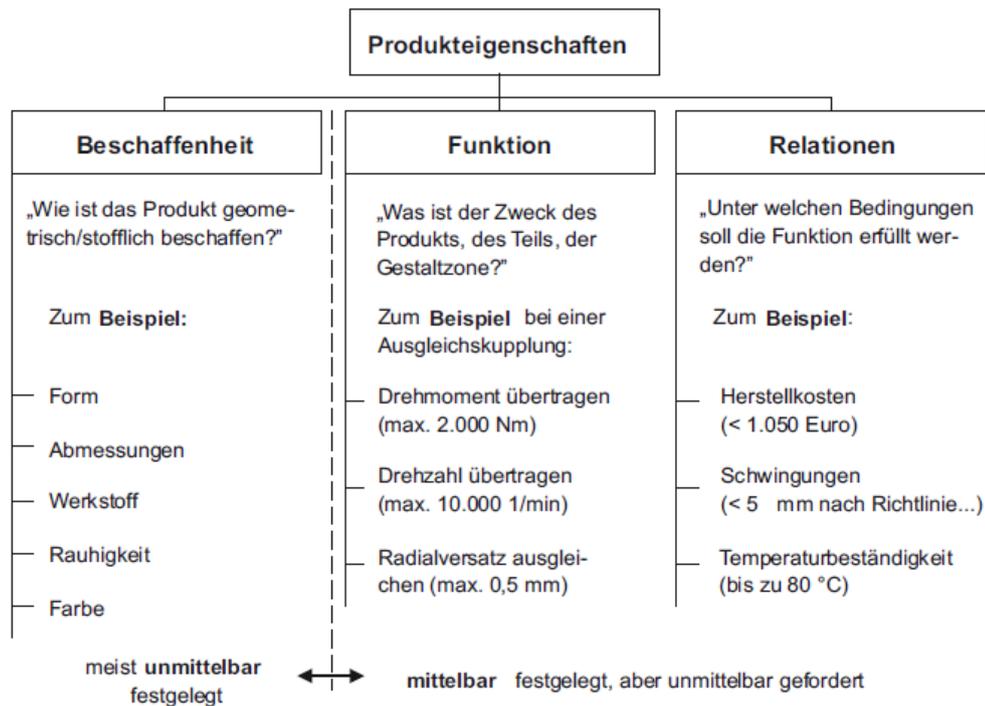
³⁰⁶ vgl. DIN 2330

³⁰⁷ Ehrlenspiel 2009 S.28

³⁰⁸ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.28

³⁰⁹ Ehrlenspiel 2009 S.28

³¹⁰ Ehrlenspiel 2009 S.28

Abbildung 2.9: Gliederung von Produkteigenschaften nach EHRENSPIEL³⁰⁴

Aus einer vergleichbaren Perspektive unterscheidet auch MEINL³¹¹ Produktmerkmale und Umfeldbeziehungen technischer Produkte, die (1) die Beschaffenheit, (2) die Fähigkeiten³¹² und (3) die Bedarfe zur Funktionserfüllung³¹³ beschreiben. Dies erfolgt zum Zweck einer einheitlichen Darstellung von Sachmerkmalen z. B. in Normen. Die jeweiligen Merkmalkategorien stünden untereinander in Beziehung, z. B. indem sich aus der Beschaffenheit auch die Verwendbarkeit ergäbe. Umgekehrt sei es die Aufgabe eines Konstrukteurs, geforderte Verwendbarkeitsmerkmale in Beschaffenheitsmerkmale eines Objekts umzusetzen. In Anlehnung an dieses Begriffsverständnis werden in DIN 4000³¹⁴ Sachmerkmal-Leisten³¹⁵ beschrieben, mit denen Angaben zur Beschaffenheit und zum Verhalten von (mechanischen, elektrischen, hydraulischen etc.) Bauteilen vermerkt werden können – auch hier wird dazu ausschließlich der Merkmalbegriff verwendet.

BIRKHOFFER versteht die Produktentwicklung „als die Auswahl und Optimierung von Parametern, um bestimmte Anforderungen zu erfüllen.“³¹⁶ Diese Parameter

³¹¹ vgl. Meinl 1990

³¹² aus denen sich die *Eignung* von Produkten oder Komponenten für eine Konstruktionsaufgabe ergibt

³¹³ aus denen sich die möglichen *Einsatzbedingungen* von Produkten oder Komponenten ergeben

³¹⁴ vgl. DIN 4000

³¹⁵ Zweck von Sachmerkmal-Leisten ist es, gleichartige Objekte voneinander zu unterscheiden, z. B. durch eine genormte tabellarische Darstellung ihrer charakteristischen Merkmale. Kriterien dazu sind die Ausprägungen ihrer charakteristischen (Sach-)Merkmale sowie ihrer Relationsmerkmale (Beziehung zu Umgebungssystemen).

³¹⁶ Birkhofer 2009

unterscheidet er in Anlehnung an HUBKA in unabhängige Eigenschaften, die als Stellgrößen in der Produktentwicklung unmittelbar festgelegt werden können, und abhängige Eigenschaften, die sich als Folgegrößen daraus ergeben.³¹⁷ Die Verknüpfung der unabhängigen und abhängigen Eigenschaften erfolge über das Wissen der Konstrukteure, das oft auf Modellbetrachtungen beruhe. Eine analoge Unterscheidung von direkt und indirekt beeinflussbaren Eigenschaften nehmen auch LINDEMANN und PONN vor.³¹⁸ EHRENSPIEL spricht hingegen bei Beschaffenheitsmerkmalen von unmittelbar festgelegten Merkmalen, wohingegen Funktions- und Relationsmerkmale nur mittelbar festgelegt werden könnten.³¹⁹

ALBERS und THAU verwenden ausschließlich den Eigenschaftsbegriff zur Modellierung mechanischer Wirk-Strukturen mit dem *Contact and Channel Approach (C&C²-A)*.³²⁰ Dabei unterscheiden sie zwischen:

- **Gestalteigenschaften**, die geometrische, räumliche und stoffliche Beschaffenheit von Wirkflächen und Leitstützstrukturen beschreiben. Sie bestimmen je nach Ausprägung die Wirkungs- und Funktionseigenschaften eines technischen Produkts.
- **Wirkungseigenschaften**, die eine Wirkung in einem Wirkflächenpaar oder einer Leitstützstruktur charakterisieren. Als Beispiele werden „*die übertragbare Reibkraft in einem Wirkflächenpaar, die maximale elastische Dehnung einer Feder*“³²¹ genannt.
- **Funktionseigenschaften**, die aus der Summe aller „*Eigenschaften der an einer Funktion beteiligten Wirkungen*“ resultieren³²². Sie hängen ab „*von den Eigenschaften der Umgebung (Eigenschaften der Connectoren)*“³²³ und den Eigenschaften der an der Funktionserfüllung beteiligten Wirkflächen(paare) und Leitstützstrukturen. Als Beispiele werden die „*Bremsleistung einer Fahrradbremse, die Einschraubzeit oder die Setzausfallrate einer Schraube*“³²⁴ genannt.

ROOZENBURG verwendet zur Beschreibung des Konstruierens ebenso ausschließlich den Eigenschaftsbegriff. Er verweist auf einen Zusammenhang von *intensive properties* (z. B. Härte, Dichte, Viskosität) und *extensive properties* (z. B. Gewicht, Steifigkeit), die aus der inneren (werkstofflichen) bzw. äußeren (strukturellen und

³¹⁷ vgl. Birkhofer 2009

³¹⁸ vgl. Ponn 2011 S.137

³¹⁹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.28

³²⁰ vgl. Albers 2014a

³²¹ Thau 2013 S.134

³²² Thau 2013 S.134

³²³ Thau 2013 S.133

³²⁴ Thau 2013 S.133f.

geometrischen) Beschaffenheit eines Produkts gebildet werden (siehe Abbildung 2.10).³²⁵ Diese Eigenschaften bestimmen je nach Betriebszustand und äußeren Randbedingungen die Funktionen eines technischen Produkts, die wiederum Bedürfnisse und Wertevorstellungen eines Anwenders erfüllen. Die Gemeinsamkeit von Eigenschaften und Funktionen läge darin, „dass sie beide etwas über das Produktverhalten aussagen“.³²⁶ Eigenschaften seien jedoch durch die Konstruktion festgelegt und daher im Gegensatz zu Funktionen „objektiv wahr oder falsch“,³²⁷ wohingegen die Funktion eines Produkts von den Absichten, Zielen etc. eines Anwenders abhänge. Die Aufgabe von Konstrukteuren sei es, die Beschaffenheit eines Produkts aus diesen geforderten Funktionen und Eigenschaften zu erdenken. Dabei sei es von größter Bedeutung, die zu erwartenden Randbedingungen im angestrebten Anwendungsumfeld zu berücksichtigen. Konstruieren sei daher mehr als nur das Festlegen der Produktgestalt; „es umfasst auch die Entwicklung ihrer Nutzung“.³²⁸ ROOZENBURG unterscheidet damit explizit zwischen solchen Größen, die die Funktion bzw. das Verhalten eines technischen Systems in seiner Anwendung beeinflussen, aber selbst konstruktiv nicht beeinflussbar sind (insbesondere Connectoren, also Eigenschaften der System-Umgebung), und jenen, die in der Konstruktion unmittelbar festgelegt werden können (Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen).

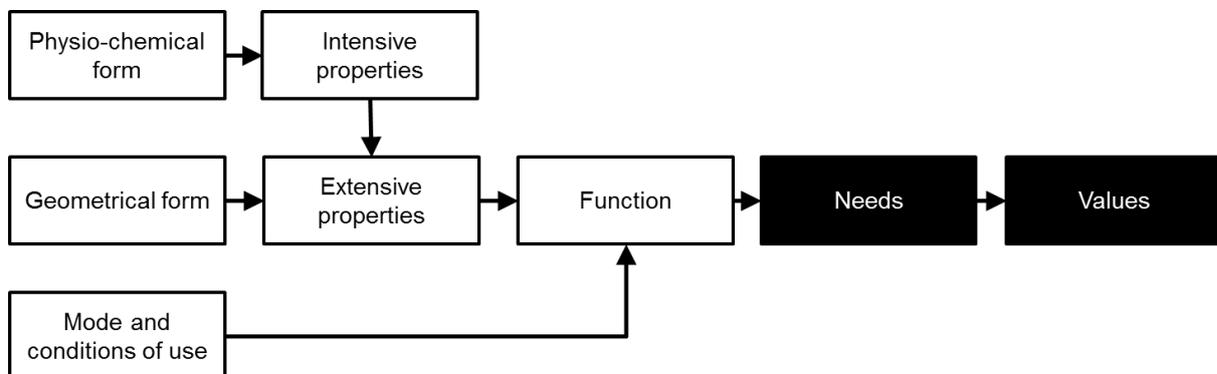


Abbildung 2.10: Zusammenhang von Eigenschaften und Funktion nach ROOZENBURG³²⁵

Auch ANDREASEN nimmt eine Unterscheidung zwischen der Möglichkeit einer direkten bzw. indirekten Einflussnahme beim Konstruieren vor. Hierbei verwendet er jedoch den Merkmalbegriff zur Kennzeichnung solcher Größen, die die Produktgestalt betreffen und von Konstrukteuren unmittelbar festgelegt werden können (entsprechend den unabhängigen Produkteigenschaften nach BIRKHOFFER).

³²⁵ vgl. Roozenburg 2002

³²⁶ Roozenburg 1995

³²⁷ Roozenburg 1995

³²⁸ Roozenburg 1995

Den Eigenschaftsbegriff hingegen verwendet er nur zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit und des Verhaltens (*performance*) eines Produkts (entsprechend den abhängigen Produkteigenschaften nach BIRKHOFFER). Sowohl Eigenschaften als auch Merkmale können verschiedene Ausprägungen haben und sich darin gegenseitig beeinflussen.³²⁹ Anders als EHRENSPIEL, LINDEMANN und BIRKHOFFER unterscheidet ANDREASEN die Begriffe Eigenschaft und Merkmal damit nicht nach dem Kriterium einer qualitativen oder quantitativen Beschreibung von Attributen, sondern nach der Einflussmöglichkeit von Konstrukteuren bei der Gestaltung technischer Systeme.

Diesem Verständnis folgt auch WEBER mit dem *Characteristics-Properties Modelling (CPM)*,³³⁰ in dem er den Merkmalbegriff verwendet, um Angaben zur Struktur, Gestalt bzw. (werkstofflichen) Beschaffenheit eines Produkts zu machen. Er merkt an, „dass (nur) diese Parameter vom Produktentwickler direkt beeinflusst werden können.“³³¹ Produkteigenschaften bezeichnen hingegen das für den Kunden relevante Verhalten. Sie „können vom Produktentwickler nicht direkt festgelegt werden, sondern eben nur über den „Umweg“, dass er/sie bestimmte Merkmale ändert.“³³² Im Detail führt WEBER weiter aus, in welcher Weise Eigenschaften und Merkmale untereinander in Beziehung stehen. Demnach ergibt sich jede Produkteigenschaft aus einer Kombination von Produktmerkmalen (siehe Abbildung 2.11). Aus einer vollständigen Merkmalsbeschreibung eines Produkts und der Annahme bestimmter äußerer Randbedingungen könnten daher alle relevanten Eigenschaften bestimmt werden, „wobei allerdings für die verschiedenen Eigenschaften in der Regel jeweils unterschiedliche Kombinationen immer derselben Merkmale maßgebend sind.“³³³ Daraus können sich laut WEBER in der Konstruktion jedoch auch Zielkonflikte ergeben, etwa wenn „eine geforderte Erhöhung der Steifigkeit [...] die Vergrößerung des Querschnittes, die gleichzeitig geforderte Verringerung des Gewichtes dagegen dessen Verkleinerung“ verlange.³³⁴ Für eine Veränderung an Produkteigenschaften bedarf es nach der von WEBER beschriebenen Theorie immer eine Veränderung an Produktmerkmalen – sei es durch beabsichtigte Maßnahmen in der Konstruktion oder durch unbeabsichtigte Vorgänge im Betrieb (z. B. durch Verschleiß).

ALBERS und ZINGEL³³⁵ schließen sich dem Begriffsverständnis von ANDREASEN und WEBER weitgehend an, indem sie im Kontext der Modellierung mechatronischer

³²⁹ vgl. Andreasen 1980

³³⁰ vgl. Weber 2014

³³¹ Weber 2012

³³² Weber 2012

³³³ Weber 2012

³³⁴ Weber 2012

³³⁵ vgl. Albers 2013, Zingel 2013

Systeme mit SysML³³⁶ den Eigenschaftsbegriff in zwei Unterkategorien gliedern: **Verhaltenseigenschaften** beschreiben direkt messbare Wirkungen (z. B. Beschleunigungen, Vibrationen, Geräusche), wohingegen eine **Struktureigenschaft** einen gemessenen oder berechneten Kennwert darstellt, der sich aus der Konstruktion ergibt (z. B. Gewicht, Kosten). Ein Merkmal hingegen bezeichne „*ein Attribut eines Strukturelements [...], z. B. Datenformat, Interfaceart, Form, Lage, Stoff*“.³³⁷ Im Gegensatz zu Eigenschaften könnten Merkmale beim Konstruieren direkt festgelegt werden.

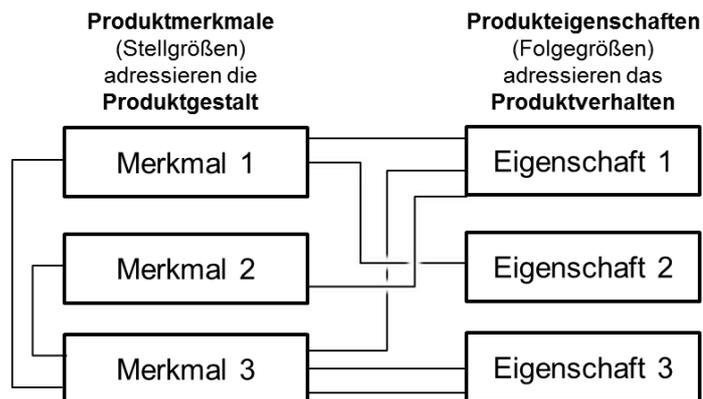


Abbildung 2.11: Merkmale und Eigenschaften eines Produkts stehen in direkter Beziehung zueinander (eigene Darstellung nach WEBER³³³)

Im Vergleich der oben vorgestellten Definitionen und Perspektiven wird das pluralistische Begriffsverständnis der konstruktionswissenschaftlichen Literatur zu Eigenschaften und Merkmalen technischer Systeme deutlich (siehe Tabelle 2-2) – jedoch sind auch einige Gemeinsamkeiten klar erkennbar. Besonders die Arbeiten der klassischen Konstruktionsmethodik³³⁸, aber auch jüngere Ansätze wie z. B. CPM/PDD,³³⁹ beziehen sich vorwiegend auf die Beschreibung mechanischer Systeme. Weiterhin besteht in allen Arbeiten Einigkeit in der grundsätzlichen Unterscheidung zwischen solchen Größen, die beim Konstruieren direkt festgelegt werden können (die Produktgestalt betreffend) und jenen, die sich daraus folgend ergeben (das Produktverhalten betreffend). Uneinigkeit herrscht jedoch in der Auffassung, welche Begriffe diese Größen jeweils bestmöglich zum Ausdruck bringen. Verschiedene Autoren, darunter HUBKA, ROOZENBURG und THAU, bevorzugen die generelle Verwendung des Eigenschaftsbegriffs, wobei sie durch vorangestellte Bezeichnungen (z. B. intern/extern) die jeweils beabsichtigte Bedeutung kennzeichnen. BIRKHOFFER, EHRENSPIEL und LINDEMANN schließen sich diesem

³³⁶ Systems Modelling Language

³³⁷ Zingel 2013

³³⁸ vgl. Hubka 2002, Ehrlenspiel 2009, Lindemann 2009a, Birkhofer 2009, Weber 2014

³³⁹ Weber 2014

Verständnis grundsätzlich an, verwenden jedoch zusätzlich den Merkmalbegriff als eine qualitative Beschreibungsform einer Produkteigenschaft. Wiederum andere Autoren, darunter ANDREASEN und WEBER, bevorzugen durch die Verwendung der voneinander abgegrenzten Begriffe „Merkmal“ und „Eigenschaft“ nicht die Unterscheidung zwischen qualitativen und quantifizierten Angaben, sondern trennen damit auch begrifflich die gestalt- von den verhaltensbeschreibenden Attributen technischer Systeme.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass fast in allen genannten Arbeiten der Eigenschaftsbegriff verwendet wird, um das Verhalten, die Fähigkeiten, Funktionen und die Beziehungen eines technischen Systems in und zu seiner Umgebung zu beschreiben (siehe Tabelle 2-2). Einigkeit herrscht ebenfalls darüber, dass diese Eigenschaften Folgegrößen der Gestaltung, d. h. der Festlegung geometrischer, stofflicher und informatorischer Parameter, sind. Der Merkmalbegriff wird dagegen vorwiegend zur Hervorhebung besonderer Eigenschaften verwendet – sei es zur besseren Unterscheidung gleichartiger Objekte oder zur Abgrenzung von gestalt- und verhaltensbeschreibenden Begriffen.

Tabelle 2-2: Verwendung der Begriffe „Merkmal“ und „Eigenschaft“ zur Beschreibung der Produktgestalt und des Produktverhaltens in der Konstruktionswissenschaft

Autor	Produktgestalt (Stellgrößen)	Produktverhalten (Folgegrößen)
HUBKA	u.a. „Interne Eigenschaft“	u.a. „Externe Eigenschaft“
ROOZENBURG	„Innere Eigenschaft“ (intensive property)	„Äußere Eigenschaft“ (extensive property)
ALBERS, THAU	„Gestalteigenschaft“	„Funktions- / Wirkungseigenschaft“
BIRKHOFFER ¹⁾	„Unabhängige Eigenschaft“	„Abhängige Eigenschaft“
LINDEMANN ¹⁾	„Direkte Eigenschaft“	„Indirekte Eigenschaft“
EHRENSPIEL ^{1), 2)}	„Eigenschaft“	„Eigenschaft“
MEINL	„Beschaffenheitsmerkmal“	„Verwendbarkeitsmerkmale“ bzgl. Eignung und Einsatzbedingungen
DIN 2330	„Beschaffenheitsmerkmal“	„Funktions- / Relationsmerkmal“
ANDREASEN	„Merkmal“ (characteristic)	„Eigenschaft“ (property)
WEBER	„Merkmal“	„Eigenschaft“

1) „Merkmal“ nach DIN 2330 statt „Eigenschaft“, wenn keine Ausprägung angegeben ist.

2) „Merkmal“, wenn eine Eigenschaft besonders hervorgehoben werden soll.

Ausgewiesene Studien zur Verwendung des Merkmal- und des Eigenschaftsbegriffs in der Konstruktionspraxis sind nach Wissensstand des Autors bislang nicht verfügbar. Ein Blick in Produktdatenblätter deutscher Maschinenbauunternehmen

zeigt jedoch, dass – neben der Bezeichnung „technische Daten“ – der Eigenschaftsbegriff auch hier fast durchgängig verwendet wird, allerdings ohne die zum Teil in der Wissenschaft übliche Differenzierung zwischen verhaltens- und gestaltbeschreibenden Eigenschaften. ECKERT stellt fest, dass in der Konstruktionspraxis zwischen den Begriffen „Eigenschaften“, „Funktionen“, und „Verhalten“ häufig keine eindeutige Unterscheidung vorgenommen wird – üblich sei vielmehr eine Zusammenfassung unter dem Begriff (funktionale) Anforderungen.³⁴⁰

Eine Unterscheidung zwischen Produkteigenschaften wird auch in DIN-Normen³⁴¹ nicht vorgenommen – hier wird jedoch ausschließlich der qualitative Merkmalbegriff verwendet. Grundlage für DIN-Normen stellt die Begriffsdefinition in DIN 2342 dar, wonach ein Merkmal verstanden wird als eine „*durch Abstraktion gewonnene Denkeinheit, die eine Eigenschaft von Gegenständen wiedergibt*“.³⁴²

Die in den nachfolgenden Kapiteln verwendete Nomenklatur schließt sich dem Konsens der konstruktionswissenschaftlichen Literatur zur Trennung von gestalt- und verhaltensbeschreibenden Begriffen an. Die verwendeten Definitionen beruhen vorwiegend auf einer Betrachtung mechanischer Systeme, sind aber im Grundsatz auch auf mechatronische Systeme übertragbar:

Der Merkmalbegriff wird verwendet, wenn von einer besonders wichtigen, kennzeichnenden Eigenschaft die Rede ist.³⁴³ Auf eine darüber hinausgehende Verwendung des Merkmalbegriffs wird verzichtet, da er weder in der Konstruktionspraxis noch in der klassischen Konstruktionswissenschaft häufig gebräuchlich ist und keine weiteren, für die vorliegende Arbeit zweckmäßigen Bedeutungsunterschiede mit sich bringt.

Der Eigenschaftsbegriff wird verwendet, um einerseits die Gestaltbeschaffenheit und andererseits die Fähigkeiten eines Produkts zur Erfüllung von Funktionen in einer bestimmten Qualität zu beschreiben. Zur besseren Unterscheidung wird der Begriff *Gestalteigenschaft* für beim Konstruieren direkt beeinflussbare Größen verwendet. Die Begriffe *Funktionseigenschaft*, *Wirkungseigenschaft* und *Zustandseigenschaft* bezeichnen hingegen solche Attribute, die sich aus den in der Konstruktion festgelegten Wirkprinzipien ergeben und das Produktverhalten bzw. die Qualität der Funktionserfüllung in der Anwendung charakterisieren. Alle vier genannten Arten von Produkteigenschaften haben einen wesentlichen Einfluss auf die Erfüllung

³⁴⁰ vgl. Eckert 2013

³⁴¹ vgl. DIN 2342, DIN 4000

³⁴² DIN 2342

³⁴³ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.28

technischer Funktionen. Sie werden daher nachfolgend auch unter dem Sammelbegriff *funktionsbestimmende Produkteigenschaften* zusammengefasst.

Der Begriff „Gestalteigenschaft“ wird im Sinne von HANSEN, LINDEMANN, BIRKHOFFER, EHRENSPIEL und THAU³⁴⁴ für solche Produkteigenschaften verwendet, die die physische Beschaffenheit von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen beschreiben und beim Konstruieren unmittelbar festgelegt werden können:

Definition 2-6: Gestalteigenschaften (engl.: characteristics)

Gestalteigenschaften beschreiben die geometrische und stoffliche sowie die logisch-strukturelle Beschaffenheit eines Produkts und dessen Teilsysteme.

Relation: Sie sind die einzigen wirkungs- und funktionsbestimmenden Eigenschaften, die beim Konstruieren unmittelbar festgelegt werden können.³⁴⁵

Beispiele aus der Mechanik: Abmessungen, Konturverläufe, Oberflächenrauheit, Toleranzen, Werkstoffe und deren Kennwerte etc.

Durch das Festlegen funktionsrelevanter Gestalteigenschaften bestimmt ein Konstrukteur maßgeblich die Beschaffenheit eines technischen Systems. Abhängig vom Betriebszustand des Systems wird sie jedoch auch von den Zustandseigenschaften der an der Funktionserfüllung beteiligten Wirk-Netze charakterisiert. Der Begriff *Zustandseigenschaft*³⁴⁶ wird daher eingeführt, um temporäre, physische Eigenschaften eines technischen Produkts zu beschreiben, die von dessen Betriebszustand abhängen.

Definition 2-7: Zustandseigenschaften (engl.: condition properties)

Zustandseigenschaften sind temporäre, physische Eigenschaften der Wirkflächen und Leitstützstrukturen eines Produkts.

Relation: Sie ergeben sich aus den (Wechsel)Wirkungen während der Funktionserfüllung, können aber auch selbst einen wirkungs- und damit funktionsbestimmenden Einfluss haben. Sie können je nach Art und Verlauf der Beanspruchung variieren und sind damit wiederum abhängig von den Gestalteigenschaften der Wirkflächen und Leitstützstrukturen.

Beispiele: Ladezustand, Temperatur, innere Spannungszustände, kinetische Energie etc.

³⁴⁴ vgl. Hansen 1976, Lindemann 2009a, Birkhofer 2009, Thau 2013

³⁴⁵ vgl. Hansen 1976, Andreasen 1980, Birkhofer 2009, Thau 2013, Weber 2014

³⁴⁶ vgl. Albers 2014a

Definition 2-8: Beschaffenheit (engl.: characteristics and condition)

Die Beschaffenheit charakterisiert den physischen Zustand und die Ausprägung der Gestalt eines Produkts bzw. seiner Teilsysteme und Komponenten.

Relation: Sie ergibt sich aus der Komposition der Gestalteigenschaften und den Zustandseigenschaften der Komponenten und Teilsysteme eines Produkts.

In Anlehnung an die Definitionen von HUBKA³⁴⁷, MEINL³⁴⁸ und THAU³⁴⁹ werden in der vorliegenden Arbeit die Begriffe *Wirkungs-* und *Funktionseigenschaft* verwendet. Sie zählen – neben den Gestalt- und Zustandseigenschaften der Wirk-Struktur – zu den funktionsbestimmenden Eigenschaften technischer Systeme, wobei sie sich (im Rahmen der vorliegenden Arbeit) ausschließlich auf die mechanische Ausführung technischer Funktionen beziehen. Andere Sachverhalte wie Kosten, Ästhetik, Ergonomie etc. werden in dieser Arbeit nicht untersucht.

Definition 2-9: Wirkungseigenschaften (engl.: wirk properties)

Wirkungseigenschaften sind wirkungsbestimmende Eigenschaften³⁵⁰ einzelner Wirkflächenpaare oder Leitstützstrukturen.

Relation: Sie ergeben sich als Folgegrößen aus der Definition von Gestalt- und Zustandseigenschaften und können je nach Art der Beanspruchung unterschiedlich ausgeprägt sein.

Beispiele:

- Geometrisch: Flächenträgheitsmoment eines Querschnitts
- Stofflich: Reibkoeffizient oder Wärmeübergangskoeffizient zweier Wirkflächen, Konduktivität einer Leitstützstruktur
- Geometrisch-stofflich: Masse, Wärmeleitwiderstand, Feder- und Knicksteifigkeit etc.

³⁴⁷ vgl. Hubka 1984

³⁴⁸ vgl. Meinel 1990

³⁴⁹ vgl. Thau 2013

³⁵⁰ vgl. Hubka 1984

Definition 2-10: Funktionseigenschaften (engl.: functional properties)

Funktionseigenschaften beschreiben Fähigkeiten eines technischen Systems und seiner Teilsysteme, die in bestimmten Anwendungsfällen ein definiertes Verhalten ermöglichen.³⁵¹

Relation: Sie sind durch die Wirkprinzipien und Wirkungseigenschaften eines Produkts als Folgegrößen der Gestaltung, d. h. der Festlegung geometrischer, stofflicher und informatorischer Attribute, determiniert.³⁵²

Beispiele: Energieeffizienz (Getriebe), Seitenbogengängigkeit (Antriebsketten), dynamische Tragzahl (Wälzlager), ausgleichend (Kupplung), etc.

Mit Klärung der Bedeutung dieser Begriffe soll nun abschließend noch definiert werden, was in der vorliegenden Arbeit mit der Bezeichnung *Wirkzusammenhang* gemeint ist. RODENACKER unterscheidet diesen Begriff auf einer logischen, physikalischen und konstruktiven Abstraktionsebene, sodass er aus verschiedenen Perspektiven von der lösungsneutralen Formulierung von Funktionen bis hin zu Wechselwirkungen in Wirkflächenpaaren verwendet werden kann.³⁵³

Nach PAHL und BEITZ wird beim Konstruieren das Ziel verfolgt, für eine gewünschte Funktion „*durch Festlegen von geometrischen und stofflichen Merkmalen*“ bzw. Eigenschaften einen Wirkzusammenhang zu realisieren der „*erzwingt, dass die Funktion im Sinne der Aufgabenstellung erfüllt wird*.“³⁵⁴ Nach RODENACKER kann dies erreicht werden, indem „*die wesentlichen Merkmale des Wirkortes, die Wirkfläche und Wirkbewegung, unter Berücksichtigung einer Reihe von Abwandlungsmöglichkeiten*“ festgelegt werden.³⁵⁵ PAHL und BEITZ merken dazu ergänzend an: „*Eine Vorstellung über die [geometrische] Gestalt genügt oft nicht, sondern erst die Festlegung prinzipieller Werkstoffeigenschaften ermöglicht eine zutreffende Aussage über den Wirkzusammenhang*.“³⁵⁶ Sie betonen damit einerseits die Bedeutung der funktionsbestimmenden Gestalt- und Zustandseigenschaften von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen, „*zum Beispiel fest, flüssig oder gasförmig, starr oder nachgiebig, elastisch oder plastisch, hohe Festigkeit und Härte oder hochzäh, verschleißfest oder korrosionsbeständig usw.*“³⁵⁷ Andererseits wird daraus ersichtlich, dass sich Wirkzusammenhänge üblicherweise aus mehreren

³⁵¹ vgl. Andreasen 1980, Hubka 1984, Weber 2000, Paetzold 2006, Albers 2014a, Thau 2013

³⁵² vgl. Andreasen 1980, Hubka 1984, Weber 2000, Birkhofer 2009, Kortler 2012, Thau 2013

³⁵³ Rodenacker 1991 S.26

³⁵⁴ Pahl & Beitz 2005 S.50

³⁵⁵ Rodenacker 1991 S.140

³⁵⁶ Pahl & Beitz 2005 S.52

³⁵⁷ Pahl & Beitz 2005 S.52

Einflussgrößen ergeben (sie sind also multivariat), die beim Konstruieren festgelegt und aufeinander abgestimmt werden müssen.

Ergänzend zu den konstruktiv beeinflussbaren Wirkzusammenhängen verweist BIRKHOFFER auf *prozessabhängige* Produkteigenschaften, die sich erst durch Interaktionen eines Produkts mit seinen Umgebungssystemen einstellen und von diesen „beeinflusst und manchmal sogar dominiert werden“.³⁵⁸ Demzufolge werden die Ausprägungen von Gestalt-, Zustands- und Funktionseigenschaften eines technischen Produkts ebenso durch beabsichtigte oder unbeabsichtigte, vermeidbare oder unvermeidbare Beanspruchungen in der Produktion und im Betrieb beeinflusst. In den nachfolgenden Kapiteln werden Gestalt- und Prozessparameter als funktionsbestimmende Größen bei der Modellbildung berücksichtigt.

Definition 2-11: Wirkzusammenhang (engl.: interdependency)

Ein Wirkzusammenhang bezeichnet in der vorliegenden Arbeit eine kausale Beziehung zwischen

- der Ausprägung geometrischer, stofflicher und informatorischer Eigenschaften von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen und
- der Ausprägung einer *Funktion* oder *Funktionseigenschaft* eines technischen Produkts.

Ebenso können Wirkzusammenhänge zwischen *Prozessparametern* und *Funktionen* oder *Funktionseigenschaften* bestehen, die sich aus der Beanspruchung z. B. in der Produktion oder im Betrieb ergeben.

Bei *multivariaten* Wirkzusammenhängen müssen *mehrere* Einflussgrößen auf eine Funktion oder Funktionseigenschaft – und ggf. auch Wechselwirkungen zwischen diesen Einflussgrößen – berücksichtigt werden.

Beispiele: siehe Abbildung 5.9 in Kapitel 5.3.1.

2.4.2 Einflussbeziehungen und Ausprägungen von Produkteigenschaften

In der Frage, wie die Eigenschaften eines Produkts (Gestalt-, Wirkungs-, Zustands- und Funktionseigenschaften) untereinander in Beziehung stehen und wie diese Relationen für die Konstruktionsmethodik nutzbar gemacht werden können, sind in der Literatur bislang nur vereinzelte Aussagen zu finden.

³⁵⁸ Birkhofer 2009

Stark vereinfacht geht SUH in seiner *Design Equation*³⁵⁹ ausschließlich von linearen Zusammenhängen aus, die sich in Matrizengleichungen ausdrücken lassen. Tatsächlich sind Einflussbeziehungen z. B. zwischen Gestalt- und Wirkungseigenschaften meist nicht linear,³⁶⁰ wie etwa das Beispiel des Reibungskoeffizienten³⁶¹ zeigt. Andernfalls wäre in jedem Fall eine einfache Korrelationsanalyse durchführbar, bei der die (lineare) Relationsgleichung exakt bestimmt werden könnte (siehe Kapitel 2.5.3).

PONN und LINDEMANN gehen daher davon aus, dass zwischen den Eigenschaften eines Produkts Zusammenhänge bestehen, die „über bestimmte Gesetzmäßigkeiten“ definiert beschreibbar,³⁶² beim Konstruieren a priori jedoch nicht immer genau bekannt sind. Sie adressieren damit vor allem jene Gleichungen, die der Dimensionierung zugrunde gelegt werden. Beispiele für die Nutzung bekannter Zusammenhänge von Produkteigenschaften beim Konstruieren sind zu finden bei

- KÖHLER und WEBER,³⁶³ die Relationen zwischen den Gestalteigenschaften eines Wälzlagers (z. B. Innendurchmesser und Breite des Innenrings) und seinen Funktionseigenschaften (z. B. Tragzahl, Grenzdrehzahlen) beschreiben.
- BIRKHOFFER,³⁶⁴ der Beziehungen zwischen abhängigen und unabhängigen Eigenschaften beschreibt, z. B. zur Berechnung des Wärmeleitwiderstands eines Leitungsquerschnitts (siehe Abbildung 2.13 in Kapitel 2.4.3).

Sowohl WEBER³⁶⁵ als auch PONN und LINDEMANN³⁶⁶ betonen, dass durch die Änderung einer Gestalteigenschaft oft mehrere Wirkungs- bzw. Funktionseigenschaften gleichzeitig beeinflusst werden. Andererseits müssen zur Realisierung einer bestimmten Wirkungs- oder Funktionseigenschaft meist mehrere Gestalteigenschaften aufeinander abgestimmt werden.

Neben diesen funktional begründeten Relationen beschreibt WEBER auch geometrisch-räumliche Abhängigkeiten zwischen Gestalteigenschaften.³⁶⁷ So sind die Abmessungen eines Getriebegehäuses beispielsweise gekoppelt an die Lage und Größe der Zahnräder und Wellen sowie an die Lage der Schnittstellen der umliegenden Teilsysteme eines Antriebstrangs.

³⁵⁹ vgl. Suh 1990

³⁶⁰ vgl. Prüfer 1982 S.3

³⁶¹ vgl. Popov 2009

³⁶² Ponn 2008 S.125

³⁶³ vgl. Köhler 2008

³⁶⁴ vgl. Birkhofer 2009

³⁶⁵ vgl. Weber 2012

³⁶⁶ vgl. Ponn 2008

³⁶⁷ vgl. Weber 2012

Detaillierte Ausführungen zu Beziehungen zwischen Wirkungs- und Funktionseigenschaften finden sich in der Literatur nur sporadisch. WEBER gibt zumindest an, dass sie „*nicht notwendigerweise unabhängig voneinander sein*“ müssen,³⁶⁸ geht aber nicht näher auf mögliche Abhängigkeiten ein. THAU hingegen beschreibt über den Zusammenhang von Wirkungs- und Funktionseigenschaften implizit eine *Komposition* von (Teil-)Eigenschaften zu (Gesamt-)Eigenschaften – ebenso wie sich analog eine Funktion aus einer Kombination bestimmter dazu erforderlicher Wirkungen ergibt.³⁶⁹ Ergänzend dazu verweist KORTLER darauf, dass *Aggregationen* verschiedener (Teil-)Eigenschaften zu komplexeren (Gesamt-)Eigenschaften möglich seien,³⁷⁰ mit denen z. B. das für einen Anwender wahrnehmbare Verhalten eines Produkts beschrieben werden kann (siehe Abbildung 2.12). Die Ausprägung der einzelnen Eigenschaften könne dabei von äußeren Einflüssen abhängig sein, die aus Interaktionen eines Produkts mit seiner Umgebung resultieren. Als Beispiel nennt er die Sensitivitäten und Trägheiten verschiedener Teilsysteme, aus denen sich (je nach Anwendungssituation) die Mess- und Stellgenauigkeit einer Maschine ergibt.

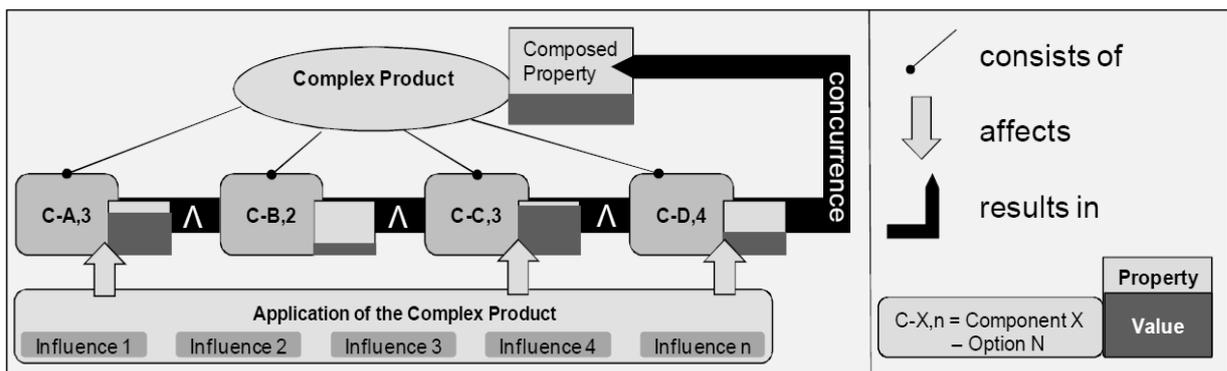


Abbildung 2.12: Aggregation von Funktionseigenschaften nach KORTLER³⁷⁰

ALBERS integriert die äußeren Einflüsse und Eigenschaften der Umgebungssysteme mithilfe von Connectoren in die Modellbildung,³⁷¹ WEBER durch Verweis auf „*external conditions (EC)*“.³⁷² Nach ALBERS ist es die Aufgabe eines Systemkonstruktors, alle relevanten Einflüsse, Interaktionen und Zustände bereits in der Konstruktion umfassend vorzuzudenken und in die Gestaltung miteinzubeziehen.³⁷³

³⁶⁸ vgl. Weber 2012

³⁶⁹ vgl. Thau 2013

³⁷⁰ vgl. Kortler 2012

³⁷¹ siehe Kapitel 2.3.3, vgl. Albers 2014a

³⁷² Weber 2012

³⁷³ vgl. Albers 2014a

Da „sich die relevanten [verhaltensbeschreibenden] Eigenschaften nicht immer sauber quantifizieren lassen“³⁷⁴ bzw. nicht immer auf denselben Skalen miteinander vergleichen lassen, rät WEBER: „wenn Eigenschaften optimiert werden sollen, die nicht quantifizierbar sind“,³⁷⁵ könne man sich mit Regeln zur Bildung selbst definierter, angepasster Skalen behelfen, die zumindest eine Vergleichbarkeit oder eine indirekte Quantifizierung über Ersatzgrößen ermöglichen. Als Beispiel seien die Arbeiten von ALBERS et al. zur Objektivierung von NVH-Phänomenen in der Fahrzeugentwicklung genannt.³⁷⁶ Die unterschiedlichen Skalen, auf denen die Ausprägungen von Eigenschaften beschrieben werden können, sind exemplarisch in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: Mögliche Ausprägungen von Eigenschaften nach GÖKER³⁷⁷

Skalentyp:	Nicht metrisch		Metrisch	
	Nominal	Ordinal	Intervall	Ratio
Messniveau:	Klassifizierung qualitativer Eigenschaftsausprägungen	Rangwerte mit Ordinalzahlen	Skala ohne natürlichen Nullpunkt	Skala mit natürlichem Nullpunkt
Aussage sinnvoll für:	Unterscheidung von Kategorien	Rangordnung von Elementen	Vergleich von Differenzen	Vergleich von Differenzen & Quotienten
Beispiel:	Farben, Werkstoffgruppen	Kunden-zufriedenheit	Celsius Skala	Abmessungen
Mögliche Rechenoperationen:	Bildung von Häufigkeiten	Ermittlung des Median	Addition, Subtraktion	Alle Grundrechenoperationen
Informationsgehalt:	niedrig	→		hoch

2.4.3 Modellbildung von Einflussbeziehungen zwischen Produkteigenschaften

Aus den oft komplexen Zusammenhängen von Funktions- und Gestalteigenschaften können sich beim Konstruieren leicht Zielkonflikte ergeben,³⁷⁸ weil es z. B. vorkommen kann, dass dieselben Gestalteigenschaften verschiedene Funktionseigenschaften beeinflussen – für eine optimale Anforderungserfüllung aber eigentlich unterschiedliche Ausprägungen dieser Gestalteigenschaften erforderlich

³⁷⁴ Meini 1990

³⁷⁵ Weber 2001

³⁷⁶ vgl. Albers 2014b, Albers 2014c

³⁷⁷ vgl. Göker 1996 S.110

³⁷⁸ vgl. Weber 2001

wären. Eine rein qualitative Betrachtung der funktionsrelevanten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen z. B. in *Contact and Channel Modellen* kann dieser Problematik nicht gerecht werden.³⁷⁹ Nach THAU muss daher „in der Entwicklung nicht nur ein qualitatives, sondern auch ein quantitatives Systemverständnis aufgebaut werden. Das qualitative Systemverständnis verknüpft die Gestalt mit der Funktion [...]. Das quantitative Systemverständnis beschreibt den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Funktionen und den Eigenschaften der Gestalt“.³⁸⁰

Eine in der Wissenschaft wie auch in der Konstruktionspraxis typische Form der quantitativen Modellbildung ist die Beschreibung einzelner Einflussbeziehungen in Diagrammen oder mit Formeln. Als Beispiele für unterschiedliche Modellierungsarten zeigen KÖHLER, WEBER und BIRKHOFFER sowohl mathematische Gleichungen als auch korrespondierende Blockdiagramme aus Konstruktionskatalogen, um die Komposition von Wirkungseigenschaften wiederzugeben (siehe Abbildung 2.13).³⁸¹

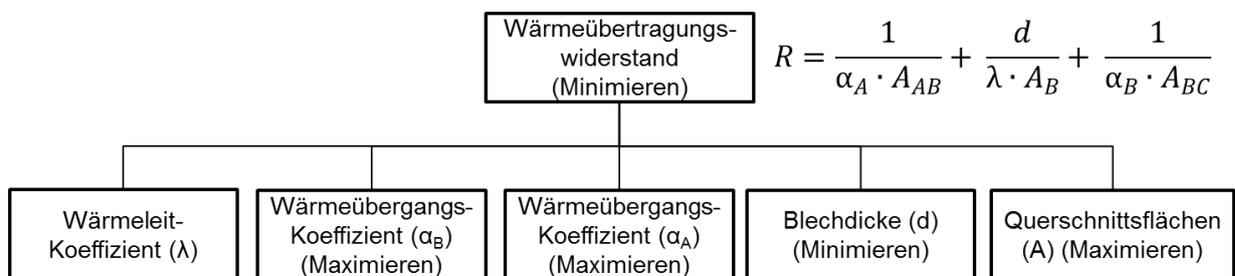


Abbildung 2.13: Eigenschafts-Verknüpfung nach BIRKHOFFER³⁸¹

Die drei vorgenannten Arbeiten zeigen exemplarisch die gängige Vorgehensweise, quantitative Funktions-Gestalt-Zusammenhänge in einzelnen jeweils dafür geeigneten Diagrammen, Tabellen, Formeln etc. auszudrücken. Ziel der Erstellung solcher Darstellungen ist es meist, Lösungen für ein Gestaltungsproblem durch Vergleiche und kausale Schlussfolgerungen zu erarbeiten (Anwendung induktiv-deduktiver Denkmuster, siehe Kapitel 2.2.1). Die analytische Herausforderung beim Interpretieren, Vergleichen und Kombinieren der in diesen Darstellungen ausgedrückten Sachverhalte besteht in der mentalen Kombination der einzelnen Erkenntnisse, wobei wiederum ein Mentalmodell erarbeitet wird: das von THAU bezeichnete „quantitative Systemverständnis“.³⁸²

Selbst bei vermeintlich gering komplexen Systemen kann es jedoch vorkommen, dass beim Vergleichen, Kombinieren und Schlussfolgern eine größere Anzahl von Abhängigkeiten und Einflussbeziehungen zwischen Gestalt- und

³⁷⁹ vgl. Albers 2014a

³⁸⁰ Thau 2013 S.133

³⁸¹ vgl. Köhler 2008, Birkhofer 2009

³⁸² Thau 2013 S.133

Funktionseigenschaften berücksichtigt werden muss.³⁸³ Durch Mentalmodelle kann diese Vielfalt oft nicht mehr hinreichend vollständig abgebildet werden.³⁸⁴ Abhängig von der subjektiv empfundenen Komplexität kann daher eine Entlastung des Arbeitsgedächtnisses³⁸⁵ durch explizite Modelle (z. B. Skizzen, Tabellen, Pfaddiagramme etc.) sinnvoll sein. Hierbei werden solche Modelle bevorzugt, die komplexe Zusammenhänge anschaulich darzustellen vermögen, sodass kombinierte Schlussfolgerungen zum Lösen eines Gestaltungsproblems möglich werden.

KÖHLER stellt fest, dass sich grafische Darstellungsformen wie beispielsweise die von WEBER im *CPM-Ansatz* genutzten Pfaddiagramme³⁸⁶ nur eingeschränkt zur Darstellung mehrerer Einflussbeziehungen zwischen Gestalt- und Funktionseigenschaften eignen, da eine übersichtliche Darstellung einer häufig großen Anzahl von Verknüpfungen kaum möglich sei.³⁸⁷ Er schlägt daher vor, Matrizen zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Produkteigenschaften zu verwenden.³⁸⁸ Dazu überführt er die grafische Notation des *CPM-Ansatz*³⁸⁹ in eine tabellarische Form (ähnlich des *House of Quality*³⁹⁰, siehe Abbildung 2.14). In diesem Modell kennzeichnet er die von einer Konstruktionsänderung betroffenen Funktions- und Gestalteigenschaften eines Produkts. Eine Voraussetzung dafür sei jedoch ein bereits vorhandenes CPM-Produktmodell, d. h. die Einflussbeziehungen zwischen Gestalt- und Funktionseigenschaften müssen bereits bekannt sein.³⁹¹

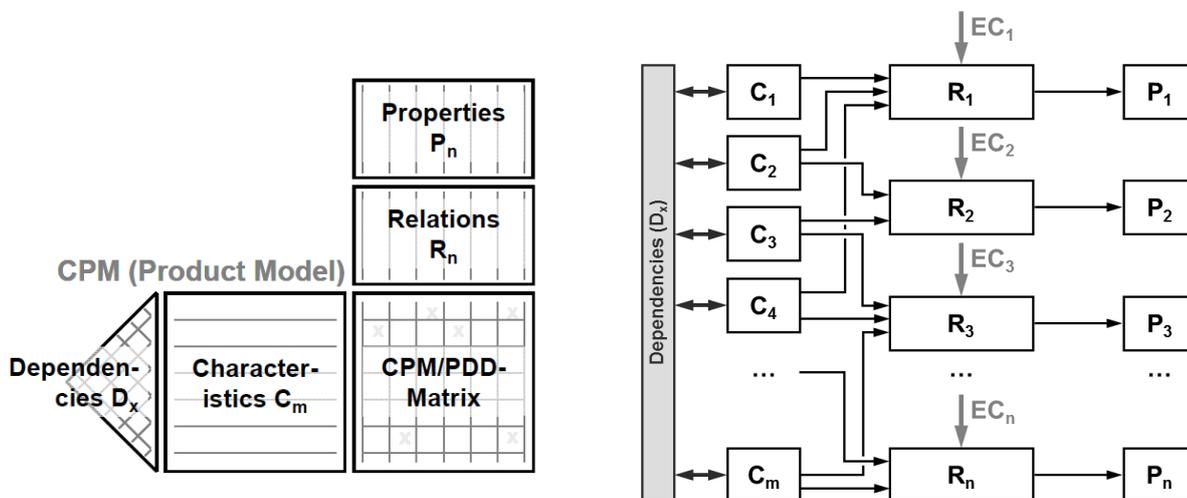


Abbildung 2.14: Matrix-Darstellung (links) und Pfaddiagramm (rechts) eines CPM-Produktmodells nach WEBER³⁸⁶ und KÖHLER³⁸⁸

³⁸³ vgl. Weber 2012 S.32, vgl. Stürtzel 2012, Kubel 2013 (betreute Abschlussarbeiten)

³⁸⁴ vgl. Weber 2001

³⁸⁵ vgl. Ehrlenspiel 2005 S.62

³⁸⁶ vgl. Weber 2000, Weber 2014

³⁸⁷ vgl. Köhler 2009 S.108f.

³⁸⁸ vgl. Köhler 2008, Köhler 2009 S.108

³⁸⁹ vgl. Weber 2000

³⁹⁰ vgl. Akao 1992

³⁹¹ vgl. Köhler 2008

In der Literatur werden ähnliche tabellarische und matrixbasierte Modelle beispielsweise zur Bewertung von Lösungsalternativen (z. B. bei einer gewichteten Punktbewertung wie der Nutzwertanalyse) oder zur Beschreibung von Lösungsmustern verwendet.³⁹² Die Modellbildung erfolgt dabei entweder rein qualitativ, d. h. durch Kennzeichnung von Zusammenhängen mit einem dafür definierten Symbol (z. B. ein „0“, „!“ oder „X“), oder anhand einer numerischen Bewertungsskala, mit der eine Einflussstärkeanalyse vorgenommen werden kann.

2.4.4 Bedeutung der Eigenschaftsbeschreibung für das Konstruieren

Die Bedeutung von Produkteigenschaften wird bereits bei der Definition von Produktprofilen, initialen Zielsystemen und den darin enthaltenen technischen Anforderungen deutlich.³⁹³ SEIFFERT³⁹⁴ fordert beispielsweise die Definition eines umfassenden Eigenschaftsprofils bereits zu Beginn der Entwicklung eines neuen Produkts, das im weiteren Verlauf als Leitlinie für die Konstruktion verwendet werden kann. Nach BIRKHOFER können unter Umständen neue Lösungen bereits durch eine „*systematische Variation von Produkteigenschaften*“³⁹⁵ mit relativ geringem Aufwand erarbeitet werden, wenn klar sei, welche Funktionseigenschaften erreicht werden sollen und welche Gestalteigenschaften dazu variiert werden müssen.

Verschiedene Autoren³⁹⁶ stellen jedoch fest, dass diese Einflussbeziehungen zwischen Gestalt- und Funktionseigenschaften nur teilweise bekannt und „*oft nicht explizit dokumentiert*“ seien.³⁹⁷ Mit verantwortlich dafür sei eine Trennung von funktions- und gestaltbeschreibenden Produktmodellen in etablierten Werkzeugen der Konstruktionspraxis wie z. B. PDM-Systeme und Simulations-/Berechnungswerkzeuge.³⁹⁸ MATTHIESEN argumentiert, dass die mangelhafte Dokumentation solcher funktionaler Zusammenhänge häufig zu Problemen und Ineffizienz in der Konstruktionspraxis führt, da ein quantitatives Systemverständnis immer wieder neu erarbeitet werden muss.³⁹⁹ Selbst bei nur geringfügigen Änderungen an einer Konstruktion, etwa bei einer Diskussion von Toleranzanforderungen zur Senkung der Produktionskosten, müsse der Zusammenhang zur Qualität der Funktionserfüllung jedes Mal neu hinterfragt und bewertet werden.

³⁹² vgl. Zangemeister 1976

³⁹³ vgl. Albers 2010, Muschik 2011

³⁹⁴ vgl. Seiffert 2008

³⁹⁵ Birkhofer 2009

³⁹⁶ vgl. Weber 2000, Albers 2002, Paetzold 2006, Birkhofer 2009, Matthiesen 2011, Weber 2012

³⁹⁷ vgl. Weber 2000

³⁹⁸ Paetzold 2006

³⁹⁹ vgl. Matthiesen 2011

BIRKHOFFER sieht die Ursache für diese Problematik nicht nur in den mangelhaften Möglichkeiten zur Dokumentation von Eigenschaftsbeziehungen. Ebenfalls dafür verantwortlich sei die Tatsache, dass in der Konstruktionspraxis viele Ursache-Wirkung-Beziehungen zwischen Produkteigenschaften gar nicht bekannt seien, nicht eindeutig vorhergesagt werden können oder nicht formalisiert beschreibbar seien. Konstrukteure müssten in diesen Fällen auf Erfahrung beruhende „*Annahmen treffen oder schätzen*“.⁴⁰⁰ Dabei grenze es an „*ein Wunder, dass Konstrukteure in so vielen Fällen erfolgreich Produkte entwickeln, obwohl dazu eine ungeheure Menge an Wissen über Beziehungen zwischen abhängigen und unabhängigen Eigenschaften nötig ist und in den einzelnen Disziplinen oft kaum konkretes und detailliertes Wissen dazu vorliegt, sondern eine Vielzahl von Widersprüchen*“⁴⁰¹ das Entwickeln von Produkten erschwere.

Der Ansatz, technische Eigenschaften von Produkten und deren Beziehungen stärker in den Fokus entwicklungsmethodischer Arbeiten zu rücken, könnte nach BIRKHOFFER jedoch „*der Schlüssel dazu sein, produkt- und prozessbezogenes Wissen neu zu ordnen*“.⁴⁰² Sein Vorschlag zur Umsetzung dieser Vision beruht auf der Darstellung von Funktionsstruktur-, Effekt-, Wirkprinzip- und Geometrie/Komponenten-Ebenen in Produktmodellen.⁴⁰³ Die Eigenschaft der Biegesteifigkeit könne beispielsweise auf den beiden letztgenannten Ebenen beschrieben werden. Die Wahl der Betrachtungsebene könne außerdem bestimmen, ob eine Eigenschaft als abhängige oder unabhängig veränderliche Größe vorliegt: „*Funktion ist eine unabhängige Eigenschaft in einem Funktionsmodell, jedoch eine abhängige Eigenschaft z. B. in einem Wirkprinzip-Modell*“.⁴⁰⁴ BIRKHOFFER schlussfolgert aus dieser möglichen Mehrdeutigkeit, dass ein streng sequenzielles Vorgehen von Funktionsstruktur- zu Geometriemodellen beim Konstruieren nicht ohne größere Schwierigkeiten möglich sei.⁴⁰⁵

WEBER führt das Phänomen der Trennung von Modellen und Werkzeugen zur Beschreibung von Funktions- und Gestalteeigenschaften auch auf kulturelle Aspekte zurück: Logisch-funktionale Beziehungen, die bei der Entwicklung von „*elektrischen/elektronischen und Software-Komponenten unerlässlich sind*“,⁴⁰⁶ werden bei der Konstruktion mechanischer (Teil-)Systeme „*traditionell nicht explizit dargestellt*“.⁴⁰⁷ Es bestünde jedoch die Möglichkeit, „*dass sich dieser Mangel durch*

⁴⁰⁰ Birkhofer 2009

⁴⁰¹ Birkhofer 2009

⁴⁰² Birkhofer 2009

⁴⁰³ vgl. Birkhofer 2009

⁴⁰⁴ Birkhofer 2009

⁴⁰⁵ vgl. Birkhofer 2009

⁴⁰⁶ Weber 2012

⁴⁰⁷ Weber 2012

*Integration des Contact and Channel Models*⁴⁰⁸ [...] *beheben oder abmildern lässt, gerade weil dieses neben mechanischen Kontakten auch fluidische, elektrische, sogar informationstechnische „Kontakte“ betrachtet*“.⁴⁰⁹ Nach Aussage von WEBER seien derartige Arbeiten jedoch noch nicht durchgeführt worden.⁴¹⁰ In der vorliegenden Arbeit soll dieser Impuls aufgenommen werden mit dem Ziel, durch Kopplung verschiedener konstruktionswissenschaftlicher Ansätze einen Beitrag zur Beschreibung von Eigenschafts-Relationen und damit zur Erschließung neuer Innovationspotenziale zu leisten.

Aus der Perspektive der Konstruktionswissenschaft ergibt sich die Bedeutung von Eigenschaften technischer Systeme zum Teil aus der oben genannten Bedeutung für die Praxis, zu einem anderen Teil aus der erkenntnistheoretischen Motivation, die wichtigen Zusammenhänge der Produktentwicklung sowohl in ihren Grundzügen als auch im Detail beschreibbar zu machen. Dass dies auf Grundlage der in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Theorien noch nicht vollständig gelungen ist, spiegeln beispielhaft drei Aussagen von WEBER wieder,⁴¹¹ wonach

- in Bezug auf die Formulierung und die (De-)Komposition von Eigenschaften eines Produkts weiterhin Forschungsbedarf bestünde. Er verweist darauf, dass es *„kein theoretisch fundiertes Konzept, sondern nur (in der Regel branchen-/unternehmensspezifische) Erfahrungswerte“* gebe, wie die oft große Anzahl von Produkteigenschaften auf einzelne relevante, handhabbare Parameter zurückgeführt werden können.
- *„völlig unklar [ist], wie sich Eigenschaften des Produkts auf die Eigenschaften seiner Komponenten verteilen oder vererben lassen.“*
- wie einzelne Funktionseigenschaften den vernetzten Dimensionen Material / Komponente / technisches (Teil-)System / sozio-technisches System zugeordnet werden und welche Gestalteigenschaften sich auf diese Funktionseigenschaften auswirken können.

2.4.5 Zwischenfazit

Produkteigenschaften spielen beim Konstruieren sowohl in Analyse- als auch in Syntheseschritten eine zentrale Rolle. Für Konstrukteure eines technischen Produkts ist es von besonderer Bedeutung, die geforderten Funktionseigenschaften des Produkts nicht nur zu kennen, sondern auch zu verstehen, wie sie durch gezielte Gestaltungsmaßnahmen, z. B. durch Variation einzelner Gestalteigenschaften,

⁴⁰⁸ gemeint sind die Arbeiten von Albers und Matthiesen zum Contact and Channel Approach (C&C²-A)

⁴⁰⁹ Weber 2012

⁴¹⁰ vgl. Weber 2012

⁴¹¹ Weber 2012

erreicht werden können. Dazu ist es erforderlich, die kausalen Einflussbeziehungen (Wirkzusammenhänge) zwischen den funktionsrelevanten Produkteigenschaften beschreiben zu können.

Die Heterogenität der in der Literatur gebräuchlichen Begriffsdefinitionen für Produkteigenschaften ist ähnlich stark ausgeprägt ist wie beim Funktionsbegriff. Die Nomenklatur der vorliegenden Arbeit wurde daher so gewählt, dass sie möglichst widerspruchsfrei im Einklang mit dem Stand der Forschung steht und es ermöglicht, miteinander korrespondierende konstruktionswissenschaftliche Arbeiten zu kombinieren. In der vorliegenden Arbeit wird von funktionsbestimmenden *Gestalteigenschaften* und *Zustandseigenschaften* gesprochen, wenn die Beschaffenheit der Produktgestalt, insbesondere der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen adressiert wird. Aus deren Festlegung in der Konstruktion resultieren die *Funktionen* und *Funktionseigenschaften* eines Produkts. Diese können je nach Perspektive der Modellbildung sowohl einen verhaltensbeschreibenden als auch einen funktionsbestimmenden Charakter haben. Der Begriff *Wirkzusammenhang* bezeichnet die wirkungs- und damit funktionsbestimmenden Einflussbeziehungen zwischen Produkteigenschaften. Die *Qualität der Funktionserfüllung* im Sinne des tatsächlich beobachtbaren Verhaltens eines Produkts hängt maßgeblich ab von den

- Ausprägungen der festgelegten Gestalt- und den daraus resultierenden Funktionseigenschaften, sowie von den
- Zustandseigenschaften der funktionsrelevanten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen, die aus der Art ihrer Beanspruchung resultieren.

Gemessen an der Bedeutung von Produkteigenschaften für die Produktentwicklung sind in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur vergleichsweise wenige Arbeiten zu finden, die sich auf Grundlage einer Modellbildung von Eigenschafts-Zusammenhängen gezielt damit auseinandersetzen, wie Konstrukteure beim Lösen von Gestaltungsproblemen unterstützt werden können. HUBKA beschreibt eine umfassende Übersicht über verschiedene Arten von Produkteigenschaften⁴¹² und bildet damit auf der erkenntnistheoretischen Ebene eine wichtige Grundlage für anwendungsorientierte entwicklungsmethodische Arbeiten. Seine Klassifikation von Eigenschaften nach *Kausalbeziehungen*, nach *Abhängigkeiten* und nach *Wirkungs- und Funktions-beschreibende* bzw. *Wirkungs- und Funktions-bedingte Eigenschaften* findet Anwendung in den Arbeiten von WEBER und ROOZENBURG,⁴¹³ die sich damit beschäftigen, wie Funktionseigenschaften konstruktiv realisiert werden können: Durch Entwicklung und Komposition von Gestalteigenschaften, aus denen sich die

⁴¹² vgl. Hubka 1984

⁴¹³ vgl. Weber 2000, Roozenburg 2002

physische Beschaffenheit eines Produkts ergibt. Dabei müssen stets die in den vorausgedachten Anwendungssituationen auftretenden Wechselwirkungen mit Umgebungssystemen berücksichtigt werden.

Trotz dieser anwendungsorientierten Tendenzen beschreibt keine der hier erläuterten Arbeiten, wie unbekannte Wirkzusammenhänge zwischen Funktions-, Zustands- und Gestalteeigenschaften ermittelt, quantitativ modelliert und ausgewertet werden können. Die vorgestellten Pfaddiagramme, Matrizen und Wirkstrukturmodelle werden in der Literatur bislang nur für eine qualitative Modellbildung genutzt.⁴¹⁴

Im nachfolgenden Kapitel werden daher ausgewählte Methoden aus verschiedenen Fachdisziplinen vorgestellt, die eine quantitative Ermittlung und Auswertung funktionsrelevanter Wirkzusammenhänge ermöglichen.

2.5 Methoden und Modelle zur Analyse technischer Wirkzusammenhänge

Ziel der Untersuchung technischer Wirkzusammenhänge ist es, die Bezüge zwischen den Gestalt- und Prozessparametern und den Funktionseigenschaften eines Produkts *„möglichst genau quantitativ aufzudecken. [...] Diese Bezüge sollten vor allem dann möglichst genau bekannt sein, wenn das Produkt [...] konzipiert und entworfen wird (Eigenschaftsfrüherkennung)“*.⁴¹⁵ Typische Fragen, die bei der Untersuchung von Wirkzusammenhängen beantwortet werden sollen, lauten: *„Wie beeinflussen die Entwurfparameter eines Produktes dessen Eigenschaften? Welche Einstellungen liefern die besten Ergebnisse oder den besten Kompromiss zwischen widersprüchlichen Zielen?“*⁴¹⁶

In den nachfolgenden Kapiteln werden verschiedene Verfahren zur qualitativen und quantitativen Untersuchung von Wirkzusammenhängen beschrieben, die

- ein vertieftes Systemverständnis über die relevanten Einfluss- und Zielgrößen sowie Randbedingungen eines Konstruktionsproblems methodisch unterstützen (Kapitel 2.5.1, 2.5.2),
- zur Erkennung und Optimierung von Wirkzusammenhängen eingesetzt werden können (Kapitel 2.5.2 und 2.5.3), sowie
- zur Verifikation von ausgewählten und prototypisch umgesetzten Gestaltungsmaßnahmen geeignet sind (Kapitel 2.5.4).

⁴¹⁴ vgl. Roozenburg 2002, Weber 2014, Köhler 2008, Albers 2014a

⁴¹⁵ Ehrlenspiel 2009 S.29

⁴¹⁶ Kleppmann 2007 S.468

2.5.1 Spezifikation von Anwendungs- und Testfällen

Die Spezifikation von Anwendungs- und daraus abgeleiteten Testfällen spielt eine entscheidende Rolle in der modernen Produktentwicklung.⁴¹⁷ Ihre Bedeutung wird beispielhaft bei Betrachtung der Arbeiten von ALBERS et al. zu X-in-the-Loop (XiL) und Test-based-Development (TbD) deutlich.⁴¹⁸ Ein wesentlicher Grund für die Beschreibung von Anwendungsfällen ist das Bestreben, die Eigenschaften der Umgebungs-Systeme und die Wechselwirkungen des zu konstruierenden Produkts mit den Umgebungs-Systemen möglichst vollständig zu bestimmen.

Soll hingegen ein bereits bestehendes (Teil-)System hinsichtlich seiner Funktion analysiert werden, erfolgt dies über Testfälle bzw. über sogenannte Manöver im X-in-the-Loop-Kontext.⁴¹⁹ Sie stellen eine besondere Form von Anwendungsfällen dar, die die „*der Verifikation der geforderten Systemattribute dienen (z. B. Performance, Haltbarkeit, Sicherheit etc.)*“,⁴²⁰ z. B.

- bestimmte Problem- bzw. Extremsituationen (z. B. Kollisionen) oder auch
- vorausgedachte Anwendungssituationen innerhalb von Anwendungsfällen (z. B. gewünschte Produktfunktionen und zugehörige Charakteristika der relevanten Umgebungssysteme).

Diese Problem- bzw. Anwendungssituationen können mithilfe von Methoden des Systems Engineering sowie Fehler- und Risikoanalysemethoden (z. B. FMEA) bestimmt werden.⁴²¹ Die Spezifikation von Testfällen ist dementsprechend ein wichtiger Bestandteil der Vorbereitung von Erprobungen, die der Funktions- bzw. Eigenschaftsabsicherung dienen.⁴²²

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für die Beschreibung von Testfällen liegt in der Vorbereitung von Versuchen, die mit dem Ziel durchgeführt werden, neue Erkenntnisse über Wirkzusammenhänge zu gewinnen, die für das Lösen eines Gestaltungsproblems relevant sein können.

Ein zentraler Bestandteil der Testfallbeschreibung ist die Spezifikation von *Zielgrößen*, die durch Versuche, Berechnungen und/oder Simulationsexperimenten verifiziert oder validiert werden sollen.⁴²³ In der Konstruktion sind damit meist Funktionen sowie Funktions- und Zustandseigenschaften eines Produkts oder seiner Teilsysteme gemeint – etwa der Wirkungsgrad oder die Temperaturverteilung in hochbelasteten Einheiten. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die

⁴¹⁷ vgl. Pohl 2007 S.127ff., Alt 2009 S.25

⁴¹⁸ vgl. Albers 2008b, Albers 2014b, Albers 2014c, Albers 2015a

⁴¹⁹ vgl. Albers 2008b, Düser 2010, Albers 2014b, Albers 2014c

⁴²⁰ Zingel 2013 S.138

⁴²¹ vgl. Gundlach 2004 S.182

⁴²² vgl. Zingel 2013 S.131

⁴²³ vgl. Albers 2008b

interessierenden Zielgrößen möglichst unmittelbar beobachtet bzw. gemessen werden können.⁴²⁴ Zudem muss die Auswahl der interessierenden Zielgrößen mit den verfügbaren Methoden abgeglichen werden: Einige Zielgrößen können nur durch Versuche, andere auch durch Berechnungen und Simulationsexperimente verifiziert bzw. validiert werden.

Um Abhängigkeiten zwischen Zielgrößen besser einschätzen zu können, schlägt GUNDLACH eine Zielgrößenanalyse vor.⁴²⁵ Dabei werden komplementäre, konkurrierende und indifferente Beziehungen zwischen Zielgrößen dokumentiert und bewertet (siehe Tabelle 2-4). Eine komplementäre Beziehung liegt vor, wenn „*ein erhöhte (gesteigerte) Erfüllung einer Zielgröße zu einer erhöhten Erfüllung einer anderen Zielgröße*“⁴²⁶ führt. In diesem Fall müsse geprüft werden, ob eventuell eine Operationalisierung ein und derselben Zielgröße vorliegt. Konkurrierende Beziehungen liegen hingegen vor, wenn eine gegensinnige Abhängigkeit zwischen Zielgrößen vorliegt. Sofern eine gegenseitige Beeinflussung nicht erwartet wird, können sie als indifferent bewertet werden.⁴²⁷

Tabelle 2-4: Bewertung von Beziehungen zwischen Zielgrößen nach GUNDLACH⁴²⁶

	y ₁		y ₂		y ₃		y ₄	
	K	B	K	B	K	B	K	B
y ₁			x	↑	o	↓	x	↑
y ₂					-	→	x	→
y ₃							o	↓
y ₄								

Legende:

K: Kenntnisstand der Abschätzung über Beziehungen zwischen y_i

B: Art der Beziehung zwischen y_i

x : gesichert

o : vermutet

- : unbekannt

↑ : komplementär

↓ : konkurrierend

→ : indifferent

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Testfallbeschreibung ist die Ermittlung der relevanten *Einflussgrößen*, die die ausgewählten Zielgrößen qualitativ und quantitativ bestimmen. Einflussgrößen werden in der Literatur unterschieden in *Steuer-* bzw. *Stellgrößen*,⁴²⁸ die konstruktiv unmittelbar festgelegt werden können, sowie *Störgrößen*, die durch benachbarte und Umgebungssysteme induziert werden.⁴²⁹ Ihnen gemeinsam ist, dass sie einen wirkungsbestimmenden Einfluss auf die Art der Wandlung von Kräften, Energie, Stoff und Information haben. Alle Einflussgrößen

⁴²⁴ vgl. Gundlach 2004 S.190f.

⁴²⁵ vgl. Gundlach 2004 S.188ff.

⁴²⁶ Gundlach 2004 S.189

⁴²⁷ vgl. Gundlach 2004 S.189 nach Mayers 1997

⁴²⁸ in der Literatur werden die beiden Begriffe je nach Quelle synonym verwendet

⁴²⁹ vgl. Kleppmann 2011 S.11

und Zielgrößen, die ein bestimmtes Produktverhalten bestimmen bzw. beschreiben, werden unter der Bezeichnung *Wirkgrößen* zusammengefasst.⁴³⁰ Ein Wirkzusammenhang beschreibt demzufolge, welche Einflussbeziehung zwischen diesen Wirkgrößen bestehen. Im folgenden Teilkapitel wird näher darauf eingegangen, wie die für einen Testfall relevanten Einflussgrößen und Einflussbeziehungen systematisch ermittelt werden können.

2.5.2 Ermittlung und Bewertung relevanter Einflussbeziehungen

Eine wichtige Voraussetzung für eine gezielte Analyse von Wirkzusammenhängen ist eine systematische Bestimmung der relevanten Einflussgrößen und Einflussbeziehungen.⁴³¹ Eine (ggf. iterative) Wahl der Systemgrenze ist dabei von zentraler Bedeutung. Dies erfordert einerseits eine geeignete Modellbildung, andererseits eine intensive Kommunikation der Beteiligten im Entwicklungsprozess. Nach DAVENPORT ist diese Kommunikation jedoch gerade in interdisziplinären Entwicklungsteams oft mit der Herausforderung verbunden, ein einheitliches Verständnis für Begriffe und Zusammenhänge herzustellen.⁴³²

Experimentelle Analyseverfahren zur Bestimmung relevanter Einflussgrößen werden in der Literatur unter dem Stichwort *Screening-Versuche* diskutiert. „*Sie werden empfohlen, wenn mit möglichst wenigen Einzelversuchen viele Faktoren gleichzeitig mit dem Ziel untersucht werden sollen, die wenigen wichtigen zu erkennen.*“⁴³³ Dazu werden die Ausprägungen potenzieller Einflussgrößen in diskreten Schritten jeweils gezielt variiert – mit dem Ziel, kausale Veränderungen an den interessierenden Zielgrößen (z. B. Funktionseigenschaften eines Produkts) zu erkennen und damit relevante Einflussgrößen zu ermitteln.

Ein klassisches diskursives Verfahren zur Bestimmung von Einflussgrößen ist das Ishikawa-Diagramm, bei dem Ursache-Wirkung-Zusammenhänge für die Dimensionen Mensch, Maschine, Material, Methode, Milieu und Messung ermittelt werden.⁴³⁴ Ein weiteres diskursives Verfahren zur Bewertung relevanter Einflussgrößen beschreibt GUNDLACH anhand von Korrelationsmatrizen, in denen vermutete Beziehungen zwischen Stellgrößen (x) und Zielgrößen (y) beschrieben werden.⁴³⁵ Falls Korrelationen vermutet werden oder bekannt sind, sollten diese

⁴³⁰ vgl. Gundlach 2004 S.184

⁴³¹ vgl. Kleppmann 2007 S.275

⁴³² vgl. Davenport 2000

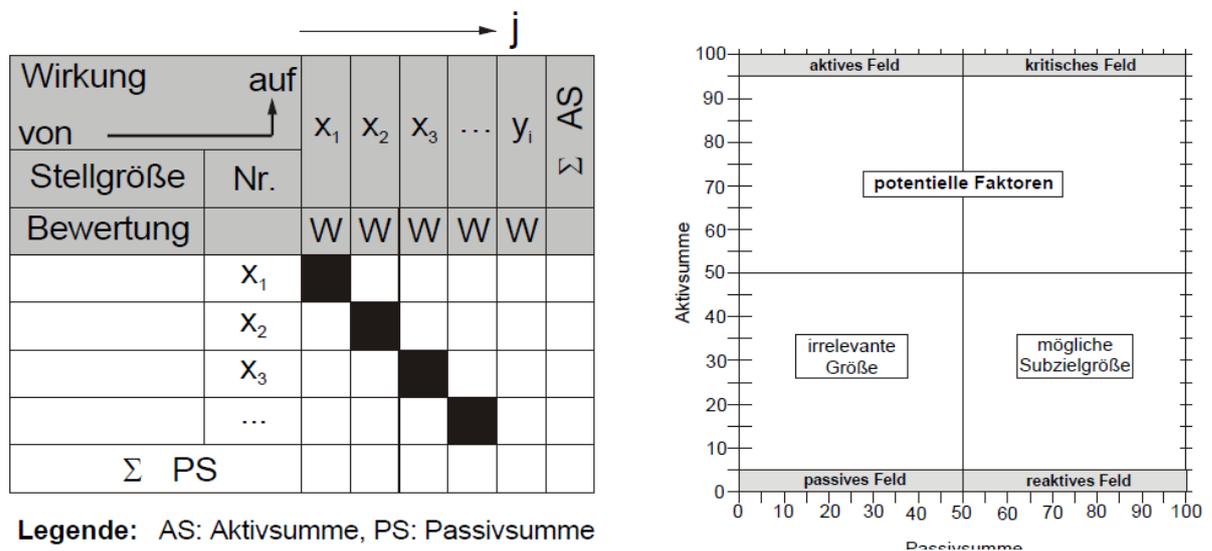
⁴³³ vgl. Kleppmann 2007 S.477

⁴³⁴ vgl. Kleppmann 2011 S.21

⁴³⁵ vgl. Gundlach 2004 S.197ff.

durch Symbole kenntlich gemacht oder auf einer Bewertungsskala⁴³⁶ quantifiziert werden (siehe Abbildung 2.15).

Da es sich bei den Korrelationen um Wechselwirkungen (W) handelt, müsste theoretisch „das Feld der Zeile „i“ und Spalte „j“ den gleichen Schätzwert aufweisen, wie das Feld „j“ der Spalte „i“ [...]“.⁴³⁷ Durch bewusstes, vollständig manuelles Ausfüllen der Matrix ließen sich Unsicherheiten bezüglich der getroffenen Abschätzung aufschlüsseln: „Je größer die Abweichung zwischen Feld „ij“ und „ji“, desto größer ist auch die Unsicherheit“.⁴³⁸ Die Ergebnisse können nach MAYERS in eine Portfolio-Darstellung überführt werden, indem die jeweiligen Aktiv- und Passivsummen der Zeilen- bzw. Spalteneinträge gebildet und auf entsprechenden Skalen aufgetragen werden.⁴³⁹



Legende: AS: Aktivsumme, PS: Passivsumme

Abbildung 2.15: Korrelationsmatrix mit Portfolio-Diagramm nach GUNDLACH⁴³⁷ und MAYERS⁴³⁹

Für eine weiterführende Erläuterung verschiedener matrizen-, portfolio- und graphenbasierter Analyse- und Visualisierungstechniken sei exemplarisch auf die Arbeiten von LINDEMANN⁴⁴⁰ verwiesen, der diese im Kontext von Forschungsarbeiten zum Komplexitätsmanagement verwendet. Er stellt fest, dass sich Kombinationen aus Matrizen und Graphen insbesondere für solche Untersuchungen eignen, bei denen Einflussgrößen und Einflussbeziehungen zwar grundsätzlich bekannt sind,⁴⁴¹ aber nicht in mathematischen Gleichungen formuliert werden können.⁴⁴² Obwohl beide Darstellungsformen ineinander überführt werden können, „nutzen nur wenige

⁴³⁶ z. B. von 0 = „keine Einflussbeziehung erwartet“ bis 3 = „starke Einflussbeziehung erwartet“

⁴³⁷ Gundlach 2004 S.199

⁴³⁸ Gundlach 2004 S.199

⁴³⁹ vgl. Mayers 1997

⁴⁴⁰ vgl. Lindemann 2009b

⁴⁴¹ beispielsweise aus bestehenden Datensätzen oder aus Befragungen, vgl. Lindemann 2009b S.79

⁴⁴² vgl. Lindemann 2009b S.33, S.40

Ansätze diese Kombination, um von den Eigenschaften beider Darstellungsformen zu profitieren“.⁴⁴³ Während Graphen sich vor allem zur Visualisierung von Strukturen bzw. Einflussbeziehungen eignen, ermöglichen Matrizen die Anwendung manueller und computerunterstützter Analysealgorithmen,⁴⁴⁴ um Aktivitäts- bzw. Passivitätscharakteristika einzelner Einflussgrößen oder auch Ausbreitungspfade zu bestimmen.⁴⁴⁵ Die aus Matrixanalysen (z. B. mit Inter-Domain- und Multiple-Domain-Matrizen) gewonnenen Erkenntnisse über Einflussbeziehungen können in Portfolios dargestellt werden (vgl. Abbildung 2.16), die eine Übersicht über aktive, passive, inerte und kritische Einflussgrößen im Kontext der gewählten Systemstruktur geben. Um daraus kritische Einflussgrößen zu bestimmen, kann ein Schwellenwert festgelegt und als Linie im Portfolio eingetragen werden, der sich aus dem Produkt der Aktiv- und Passivsummen ergibt.⁴⁴⁶

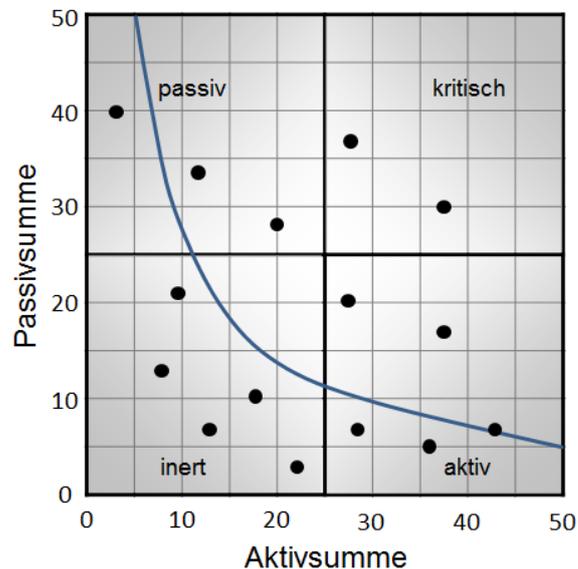


Abbildung 2.16: Portfolio zum Vergleich aktiver, passiver und kritischer Einflussgrößen

Ein weiteres deduktives Analyseverfahren, mit dem die für ein Gestaltungsproblem relevanten Einflussgrößen bestimmt werden können, stellt die Modellbildung mit dem bereits in Kapitel 2.3.3 und 2.4.5 vorgestellten *Contact and Channel Approach (C&C²-A)*⁴⁴⁷ dar. Anwender werden durch die Erstellung von Contact and Channel Modellen angeleitet, Hypothesen zu formulieren, die problemrelevante Wirkzusammenhänge erklären oder sogar erste mögliche Lösungswege aufzeigen. Die inhaltliche Aussage einer solchen Hypothese kann sich beispielsweise auf eine Vermutung beziehen, dass bestimmte Eigenschaften von Umgebungs-Systemen in

⁴⁴³ Lindemann 2009b S.40

⁴⁴⁴ vgl. Lindemann 2009b S.126 , S.122

⁴⁴⁵ vgl. Lindemann 2009b S.127ff.

⁴⁴⁶ vgl. Lindemann 2009b S.162f.

⁴⁴⁷ vgl. Albers 2014a

der Modellbeschreibung berücksichtigt werden müssen (durch Connectoren) und dass entsprechende Wirkflächenpaare von Bedeutung sind. Sofern diesbezüglich bereits Klarheit besteht, kann sich eine Hypothese auch darauf beziehen, „*wie stark die stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente⁴⁴⁸ die Eigenschaften der Wirkung und damit die Eigenschaften der Funktion beeinflussen*“.⁴⁴⁹ Je nach Kenntnisstand der beteiligten Personen werden demnach unterschiedlich detaillierte bzw. fokussierte Hypothesen gebildet, die anschließend anhand von Rechercharbeiten oder anhand von experimentellen Untersuchungen zu überprüfen sind.

Mögliche Vorgehensweisen zur experimentellen Überprüfung dieser Hypothesen fasst THAU in Heuristiken zur „*Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen*“⁴⁵⁰ sowie zur „*Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften*“⁴⁵¹ zusammen. Er verfolgt damit das Ziel, Konstrukteuren „*in komplexen Problemsituationen intuitive Daumenregeln oder Faustregeln*“ an die Hand zu geben,⁴⁵² anstatt eine Methode zu entwickeln, mit der die beste Lösung exakt bestimmt werden kann. Er adressiert damit vorrangig Konstrukteure mit umsetzungsorientiertem Handlungstyp⁴⁵³ (vgl. Kapitel 2.2.2), indem er Wege für eine opportunistische und intuitive Problemanalyse und Lösungsfindung aufzeigt. Gleichzeitig weist er auf die damit verbundenen Risiken hin: Heuristiken erforderten eine besondere „*heuristische Kompetenz*“ um sie anzuwenden, hätten „*nur eine beschränkte Aussagesicherheit*“ und sind „*nicht zwingend erfolgführend, sie können sogar zu fehlerhaften Ergebnissen führen*“.⁴⁵⁴

Die von THAU beschriebenen Heuristiken zur *Bestimmung von Funktionen* beziehen sich auf Verfahren zur Entwicklung eines qualitativen Systemverständnisses, indem die an der Funktionserfüllung beteiligten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen ermittelt werden. THAU nennt dazu verschiedene Möglichkeiten, darunter

- eine beschleunigte oder verlangsamte Beobachtung des Systemverhaltens z. B. mithilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen oder Schlibfbildern,
- das Eliminieren von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen bzw. das Variieren einzelner geometrischer oder stofflicher Gestalteigenschaften, sowie
- das Nachstellen einzelner Funktionen mittels speziell dafür gefertigter Modelle.

⁴⁴⁸ der Begriff „Gestaltfunktionselemente“ wird hier als Sammelbegriff für Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen verwendet

⁴⁴⁹ Thau 2013 S.137

⁴⁵⁰ Thau 2013 S.125ff.

⁴⁵¹ Thau 2013 S.133ff.

⁴⁵² Thau 2013 S.47

⁴⁵³ vgl. Wiedner 2013 S.137

⁴⁵⁴ Thau 2013 S.49f.

Die Heuristiken zur *Verknüpfung von Funktions- und Gestalteeigenschaften*⁴⁵⁵ beziehen sich auf Verfahren zur Ermittlung der wirkungsbestimmenden Eigenschaften von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen. Sie unterstützen damit die Entwicklung eines quantitativen System- und Problemverständnisses. THAU schlägt ein Vorgehen analog zu dem oben vorgestellten *Screening-Verfahren* vor, bei dem beobachtet wird, wie sich unterschiedliche Ausprägungen der funktionsrelevanten Wirkorte auf Funktionseigenschaften eines Produkts auswirken. Diese Ausprägungen können entweder durch gezielte Manipulation oder aufgrund von z. B. Prozessschwankungen in der Produktion aufgeprägt worden sein.⁴⁵⁶

Sofern für einzelne Versuchsreihen gezielt definierte Variationen an Gestalteeigenschaften vorgenommen werden können, sollten mathematische Methoden zur Versuchsplanung und -auswertung eingesetzt werden.⁴⁵⁸ Sofern hingegen eine gezielte Variation der vermuteten Einflussgrößen nicht möglich sei, könne das resultierende Produktverhalten zumindest stichprobenartig in Versuchen bestimmt werden. In diesem Fall sei jedoch eine *„große Menge an Daten notwendig, um statistisch gesicherte Aussagen über den Zusammenhang von Funktions- und Gestalteeigenschaften zu erhalten“*.⁴⁵⁹

Die Auswertung der erhobenen Messdaten könne beispielsweise durch Aufbereitung in Diagrammen erfolgen (siehe Abbildung 2.17). THAU schlägt dazu eine Auswahl der *„besten zehn und schlechtesten zehn“* Lose⁴⁶⁰ vor. Durch das Verschieben von Grenzwerten in diesen Diagrammen können erste Anhaltspunkte für quantitative Wirkzusammenhänge zwischen Funktions- und Gestalteeigenschaften ermittelt werden.

Nachdem mit den oben beschriebenen Verfahren eine erste Auswahl relevanter Einflussgrößen bestimmt werden konnte, kann es von Interesse sein zu untersuchen, in welcher Weise die einzelnen Wirkgrößen untereinander in Beziehung stehen. Aus der Kenntnis darüber, wie die Ausprägungen einzelner Stellgrößen die interessierenden Zielgrößen beeinflussen, können gezielte Gestaltungsmaßnahmen abgeleitet werden.⁴⁶¹ Zu diesem Zweck ist eine vertiefte, quantitative Analyse von Wirkzusammenhängen nötig, wobei sich statistische Verfahren der Versuchsplanung

⁴⁵⁵ vgl. Thau 2013 S.133ff.

⁴⁵⁶ vgl. Thau 2013 S.138

⁴⁵⁷ vgl. Thau 2013 S.139

⁴⁵⁸ vgl. Thau 2013 S.140

⁴⁵⁹ Thau 2013 S.138

⁴⁶⁰ Thau 2013 S.138; jedes Los wird aus einer bestimmten Anzahl von Prüfkörpern bzw. Versuchsmodellen gebildet, für die im Versuch jeweils eine besonders gute bzw. schlechte Ausprägung der untersuchten Funktionseigenschaft beobachtet werden konnte.

⁴⁶¹ Gundlach 2004 S.243

oder auch Simulationen als Unterstützung anbieten. Sie werden in den beiden nachfolgenden Kapiteln erläutert.

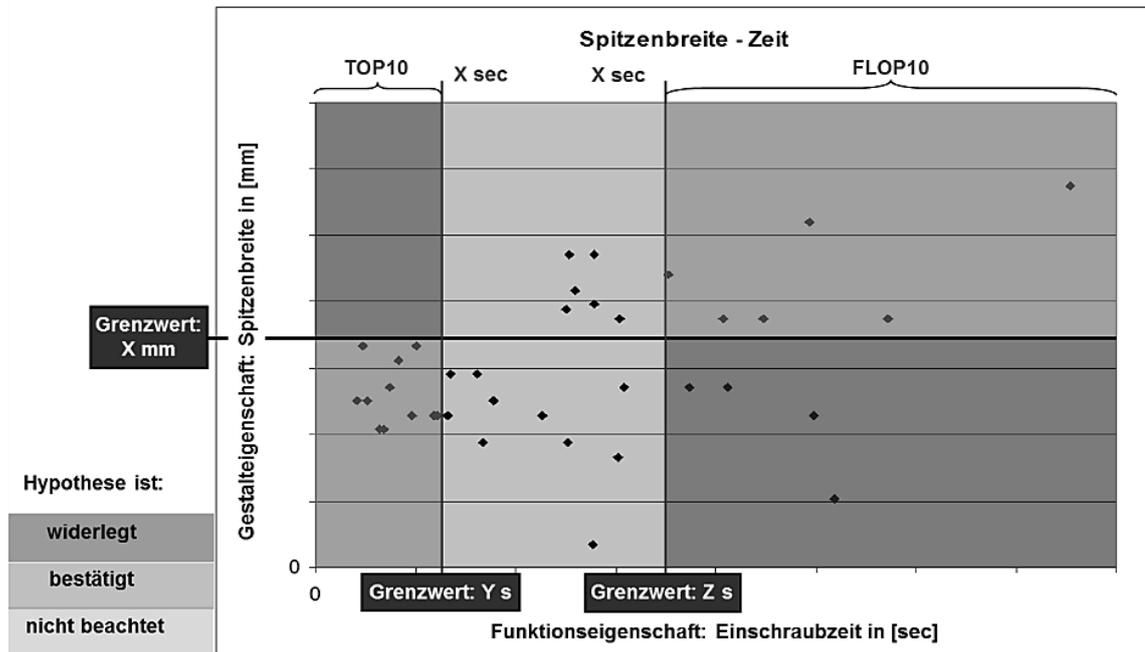


Abbildung 2.17: Auswertung eines Wirkzusammenhangs mithilfe eines Messdatendiagrammes nach THAU⁴⁵⁷

2.5.3 Statistische Verfahren zur Analyse von Wirkzusammenhängen

Die Überprüfung einer Hypothese über Wirkzusammenhänge ist durch die kombinierte Anwendung von Methoden der Versuchsplanung und der mathematischen Datenauswertung möglich. Nach KLEPPMANN bedeutet Versuchsplanung „wörtlich genommen nichts anderes als ein geplantes Vorgehen beim Durchführen dieser Versuche. [...] Statistische Versuchsplanung berücksichtigt darüber hinaus Aspekte der Datenanalyse bereits in der Planungsphase.“⁴⁶²

Statistische Verfahren der Versuchsplanung eignen sich besonders für solche Vorhaben, bei denen ein vertieftes, quantitatives Verständnis über Wirkzusammenhänge ermittelt werden soll. Sie umfassen Methoden zur

- Versuchsplanung (voll- und teilfaktoriell, zentral zusammengesetzt etc.),
- Festlegung des Versuchsraumes (Lage der Messpunkte und Größe des Stufenabstands), sowie zur
- Minimierung von Störeinflüssen (Randomisierung, Blockbildung etc.)

⁴⁶² Kleppmann 2007 S.468

und bieten die Möglichkeit, aus relativ wenigen, gezielt gesetzten Versuchspunkten einen vergleichsweise hohen Erkenntnisgewinn zu ziehen.⁴⁶³

Da der inhaltliche Fokus der vorliegenden Arbeit weniger auf Methoden zur Planung und Durchführung von Versuchen, sondern stärker auf Methoden zur Auswertung der dabei erhobenen Daten und zur Modellbildung liegt, sei für eine ausführliche Erläuterung der einzelnen Verfahren zur Versuchsplanung exemplarisch auf die Arbeiten von KLEPPMANN⁴⁶⁴ und GUNDLACH⁴⁶⁵ verwiesen, in denen ein umfassender Überblick zur Anwendung statistischer Methoden beschrieben wird. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich beispielsweise im Aufwand zur Vorbereitung und Durchführung, in der Genauigkeit der erreichbaren Ergebnisse und in der Robustheit gegenüber Fehlereinflüssen. GUNDLACH empfiehlt die Verwendung von Verfahren, die auf die Komplexität der Problemstellung und auf den Kenntnisstand der Anwender angepasst sind (siehe Tabelle 2-5).⁴⁶⁶

Tabelle 2-5: Empfohlene Verfahren der statistischen Versuchsplanung in Abhängigkeit vom Kenntnisstand eines Anwenders (nach GUNDLACH⁴⁶⁶)

	Anfänger	Fortgeschrittene	Spezialisten
Planung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2^k-Pläne 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2^{k-p}-Pläne ▪ zentral zusammengesetzte Pläne ▪ Box-Behnken-Pläne ▪ 3^k-Pläne 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ D-optimale Pläne ▪ Mischungspläne
Durchführung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manuelle Wahl der Versuchspunkte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Randomisierung ▪ Zentralpunkte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korrelationen(matrix) prüfen
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effekte ▪ Wechselwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regression (MLR) ▪ Residuen ▪ Koeffizienten ▪ Modellanpassung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ANOVA, MANOVA ▪ Lack of Fit ▪ Modellanpassung für mehrere Zielgrößen
Synthese	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konturplots 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flächendiagramme ▪ Vorhersagen ▪ Optimierungsverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehrzieloptimierung ▪ 4D-Grafiken

Über die Methoden zur Planung und Durchführung von Versuchen hinaus wird in der Literatur auch eine Vielzahl statistischer Verfahren zur Analyse von empirisch erhobenen Daten diskutiert. Grundsätzlich wird dabei zwischen strukturentdeckenden und strukturprüfenden Verfahren unterschieden.⁴⁶⁷ Strukturentdeckende Verfahren werden für explorative Untersuchungen eingesetzt, um aus einer größeren

⁴⁶³ vgl. Kleppmann 2011

⁴⁶⁴ vgl. Kleppmann 2007, Kleppmann 2011, Kleppmann 2013

⁴⁶⁵ vgl. Gundlach 2004

⁴⁶⁶ vgl. Gundlach 2004 S.279

⁴⁶⁷ vgl. Backhaus 2008 S.11

Datenmenge neue Erkenntnisse über bislang unbekannte Strukturen bzw. Zusammenhänge zu gewinnen. In der Literatur werden sie auch unter dem Stichwort *Data-Mining* diskutiert.⁴⁶⁸ Beim Konstruieren können sie beispielsweise genutzt werden, wenn die in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Verfahren nicht geeignet sind, um Hypothesen über mögliche Wirkzusammenhänge aufzustellen, etwa weil nicht genügend Erfahrungswerte zur Modell- und Hypothesenbildung vorliegen. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, Daten anhand von Versuchsreihen mit einer größerer Stichprobenzahl zu erfassen und diese auf mögliche Zusammenhänge hin zu untersuchen. Die dazu in der Literatur diskutierten Verfahren sind vorwiegend darauf ausgerichtet, Cluster zu bilden, Muster zu finden⁴⁶⁹ und Ausreißer zu erkennen, um eine anschließende Analyse mit strukturprüfenden Verfahren vorzubereiten.⁴⁷⁰

Strukturprüfende Verfahren dienen dazu, bereits getroffene Annahmen bzw. Hypothesen über Kausal- oder Wirkzusammenhänge mit mathematischen Modellen (Gleichungen und Graphen) empirisch zu bestätigen (und ggf. zu beschreiben) oder zu widerlegen. Sie finden beispielsweise Anwendung in Forschungsarbeiten zur Antriebstechnik und zu NVH-Phänomenen in der Fahrzeugentwicklung,⁴⁷¹ aber auch in vielen weiteren Bereichen des Maschinenbaus und der Produktentwicklung im Allgemeinen. Die zwingend erforderlichen Hypothesen können hierbei über Wirkzusammenhänge beispielsweise mit dem *Contact and Channel Approach (C&C²-A)*⁴⁷² aufgestellt werden (siehe Kapitel 2.5.2), um eine Problemstellung vorab zu strukturieren. Typische strukturprüfende Verfahren sind die Korrelations-, die Regressions- und die Varianzanalyse.⁴⁷³

Anhand einer *Korrelationsanalyse* kann überprüft werden, ob eine assoziative Verknüpfung zwischen Wirkgrößen besteht, d. h. ob anhand von empirisch ermittelten Daten belegt werden kann, dass eine Veränderung der einen Wirkgröße immer mit einer gleich- oder gegensinnigen Veränderung einer zweiten Wirkgröße einhergeht. Dazu wird aus den Mittelwerten und den Streuwerten der gemessenen Wirkgrößen ein Korrelationskoeffizient gebildet, der auf das Intervall [-1;+1] normiert ist. Er ermöglicht zumindest eine grundsätzliche Aussage über die Häufigkeit und die Richtung eines Zusammenhangs. Eine kausale Beziehung zwischen den untersuchten Wirkgrößen kann daraus jedoch nicht gefolgert werden.

⁴⁶⁸ Vgl. Fayyad 1996

⁴⁶⁹ beispielsweise „aus A und B folgt normalerweise C“

⁴⁷⁰ vgl. Fayyad 1996

⁴⁷¹ vgl. Albers 2008b, Albers 2014b, Albers 2014c

⁴⁷² vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Albers 2014a

⁴⁷³ vgl. Backhaus 2008 S.10, Kleppmann 2007 S.479

Mit einer multivariaten *Regressionsanalyse* kann geprüft werden, ob aus der vorhandenen Datenbasis⁴⁷⁴ ein quantitatives mathematisches Modell gebildet werden kann, das einen Zusammenhang zwischen einer bestimmten Zielgröße und mehreren Einflussgrößen beschreibt. Dieses Modell dient dazu, eine im Vorfeld formulierte Korrelations-These zu überprüfen. Dazu wird eine mathematische Gleichung n-ter Ordnung bestimmt und so an die empirisch ermittelten Daten angepasst, dass die Übereinstimmung möglichst gut ist. Für eine Untersuchung von multivariaten Wirkzusammenhängen eines bestimmten Testfalls, bei dem z. B.

- fünf Gestalteigenschaften als Stellgrößen (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) und eine technischen Funktionseigenschaft als Zielgröße (y) betrachtet werden sollen,
- nicht nur direkte Abhängigkeiten, sondern auch Wechselwirkungen zwischen den Stellgrößen vermutet werden,

kann eine mathematische Potenzreihe (Polynome) mit Termen für lineare und quadratische Abhängigkeiten sowie zweifach-Wechselwirkungen zugrunde gelegt werden, wobei insgesamt 20 Konstanten (a_i) bestimmt werden müssen:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_6x_1^2 + a_7x_2^2 + \dots + a_{11}x_1x_2 + \dots + a_{20}x_4x_5 \quad [2.1]$$

Eine *Varianzanalyse* ist hingegen besonders gut zur Auswertung von Versuchen mit Beteiligung von qualitativen bzw. kategoriellen Parametern geeignet, wobei die Mittelwerte und Streuwerte der empirisch ermittelten Daten miteinander verglichen werden.⁴⁷⁵ Die Verfahren zur einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA)⁴⁷⁶ haben gemein, dass sie nur Wirkzusammenhänge zwischen einer einzelnen Zielgröße und beliebig mehreren unabhängigen Stell- und Störgrößen ermitteln können. Sofern Wirkzusammenhänge zu mehreren Zielgrößen (Funktionseigenschaften) simultan untersucht werden sollen, etwa um Wechselwirkungen zu erfassen, müssen mehrfaktorielle Verfahren der Varianzanalyse (MANOVA)⁴⁷⁷ eingesetzt werden. Anstelle der einzelnen Messwerte, aus denen die Differenzialgleichungen einer ANOVA gebildet werden, dienen in diesem Fall Vektoren der Mittelwerte der gemessenen Daten, um eine mathematische Näherungsgleichung zu bestimmen. Für eine ausführliche Einführung in die mathematischen Grundlagen sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen.⁴⁷⁸

Eine Einschränkung bei der Anwendung der meisten oben genannten Verfahren besteht darin, dass nur der Zusammenhang zwischen einer einzelnen Zielgröße und

⁴⁷⁴ Diese Datenbasis muss zuvor über Versuche in ausreichender Stichprobenzahl ermittelt werden.

⁴⁷⁵ vgl. Kleppmann 2007 S.480f.

⁴⁷⁶ **analysis of variance**

⁴⁷⁷ **multivariate analysis of variance**

⁴⁷⁸ vgl. Backhaus 2008

mehreren Einflussgrößen überprüft werden kann. „Bei komplexen Modellen existieren aber oftmals mehrere abhängige, d. h. zu erklärende Variablen, bei denen untereinander ebenfalls häufig kausale Zusammenhänge vermutet werden.“⁴⁷⁹ Diese multivariaten Einflussbeziehungen können zunächst mit einem Pfaddiagramm als Strukturgleichungsmodell beschrieben werden (siehe Abbildung 2.18). Aus diesem qualitativen Modell kann anschließend ein Mehrgleichungssystem mit mehreren Regressionsgleichungen formuliert und durch mathematische Schätzverfahren geprüft werden.⁴⁸⁰ Die Besonderheit von Strukturgleichungsmodellen ist nach BACKHAUS „darin zu sehen, dass mit ihrer Hilfe auch Beziehungen zwischen latenten, d. h. nicht direkt beobachtbaren Variablen überprüft werden können.“⁴⁸¹ Beispiele hierzu können wieder aus Forschungsarbeiten zur Antriebstechnik und zu NVH-Phänomenen in der Fahrzeugentwicklung⁴⁸² genannt werden, bei denen interessierende Zielgrößen nicht immer unmittelbar beobachtet oder objektiv gemessen werden können (siehe Abbildung 2.18).

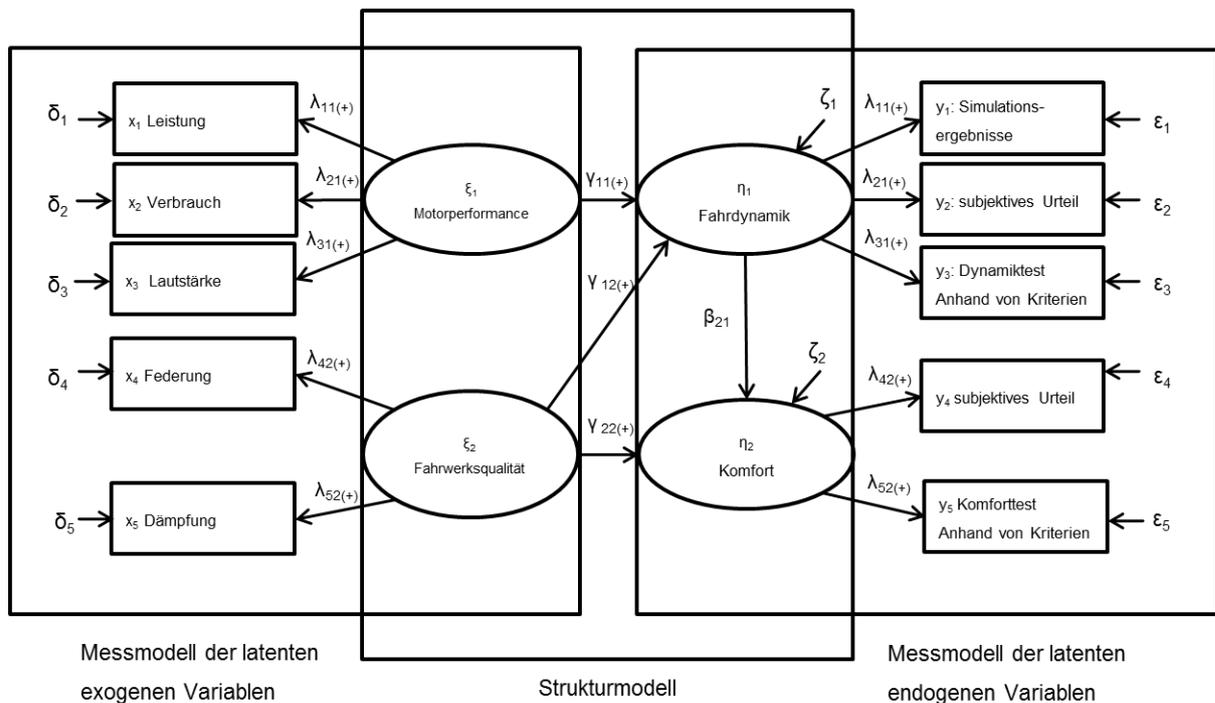


Abbildung 2.18: Pfaddiagramm eines Strukturgleichungsmodells am Beispiel der Fahrwerk- und Antriebsystementwicklung im Automobilbau⁴⁸³

Als Ergebnis der oben beschriebenen Verfahren liegen jeweils Schätzwerte für die Einflussstärke einzelner Parameter auf die untersuchten Zielgrößen vor. Zur Verwendung der Ergebnisse stellt KLEPPMANN fest: „Die statistischen

⁴⁷⁹ Backhaus 2008 S.511
⁴⁸⁰ vgl. Backhaus 2008 S.512ff.
⁴⁸¹ Backhaus 2011 S.65
⁴⁸² vgl. Albers 2008b, Albers 2014b, Albers 2014c
⁴⁸³ Dammert 2014 S.50 (betreute Abschlussarbeit)

Auswertungsverfahren [...] sind nur Mittel zum Zweck. Sie liefern Modelle, die den Wirkzusammenhang zwischen den Faktoren und den Zielgrößen quantitativ beschreiben. Und sie helfen bei der Beurteilung der Qualität dieser Modelle. Aber sie beantworten noch nicht direkt die Frage, welche Konsequenzen aus den Ergebnissen zu ziehen sind.“ Dies sei vielmehr Aufgabe des Anwenders. „Dabei sind sein Fachwissen und seine Erfahrung gefordert.“⁴⁸⁴ Die Verwendung von Grafiken und Diagrammen kann ihn bei der Interpretation der empirisch ermittelten Daten und der berechneten Ergebnisse unterstützen,⁴⁸⁵ indem mögliche Einflussbeziehungen von Stellgrößen auf Zielgrößen visuell aufbereitet werden. Typische Vertreter sind:

- *Streudiagramme*, bei denen einzelnen Messdaten in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen werden. Diese auch manuell leicht zu erstellende und daher weit verbreitete Form der Visualisierung adressiert das menschliche Vermögen, Muster in einer Punktwolke zu erkennen und so mögliche Korrelationen zu interpretieren.⁴⁸⁶
- *Höhenliniendarstellungen* bzw. *Konturplots* oder auch *Linien-* und *Flächendiagramme*, die zur Visualisierung von bereits bekannten mathematischen Modellen eingesetzt werden (siehe Formel [2.1]).⁴⁸⁷

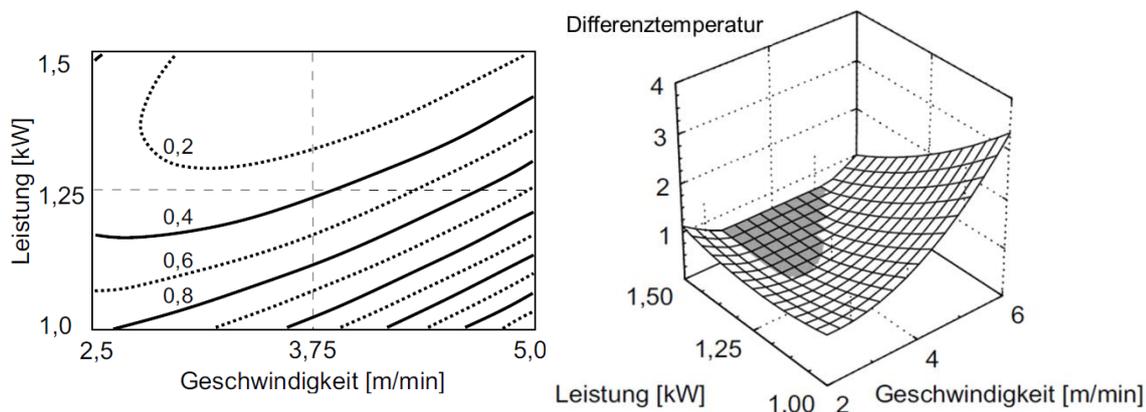


Abbildung 2.19: Linien- und Flächendiagramme visualisieren Einflussbeziehungen, die mittels statistischer Versuchsplanung und Regressionsanalyse bestimmt wurden (nach KLEPPMANN⁴⁸⁷)

Einschränkend wirkt sich bei dieser Form der Visualisierung jedoch aus, dass jeweils nur Einflussbeziehungen zwischen ein bis drei Stellgrößen und einer einzelnen Zielgröße dargestellt werden können. Sofern mehrere Zielgrößen untersucht werden sollen, müssen mehrere Diagramme überlagert werden, um beispielsweise Hinweise

⁴⁸⁴ Kleppmann 2007 S.20f.

⁴⁸⁵ vgl. Gundlach 2004 S.238

⁴⁸⁶ vgl. Ware 2004 S.189ff.

⁴⁸⁷ vgl. Gundlach 2004 S.95; Kleppmann 2007 S. 469, 480

auf ein gemeinsames Optimum bzw. eine Kompromisseinstellung ableiten zu können.⁴⁸⁸

Aus den vorangegangenen Ausführungen wird deutlich, dass – im Gegensatz zur Herleitung einer Hypothese über mögliche Wirkzusammenhänge – für deren Überprüfung die Verwendung einer Software empfohlen werden muss. Es existieren sowohl kommerzielle als auch nicht-kommerzielle Computerprogramme, die eine statistische Auswertung von empirisch ermittelten Daten umfangreich unterstützen. Beispielhaft seien die professionellen Softwarepakete „Cornerstone“, „SPSS Statistics“ und „STATA“ genannt. Für einfache Auswertungen bietet sich auch Microsoft Excel an. Die Programme ermöglichen *„zahlreiche grafische Darstellungen zur Diagnose der Daten und der angepassten Modelle, zum besseren Verständnis der Wirkzusammenhänge und zur Suche nach Kompromissen bei mehreren Zielgrößen.“*⁴⁸⁹

Sofern die interessierenden Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen und den untersuchten Stellgrößen empirisch bestätigt werden konnten, *„lassen sich hieraus Maßnahmen zur Problem- bzw. Aufgabenlösung ableiten“*.⁴⁹⁰ Dabei muss beachtet werden: *„Einstellungen, die für eine Zielgröße von Vorteil sind, können andere Zielgrößen nachteilig beeinflussen“*.⁴⁹¹ GUNDLACH schlägt daher eine schrittweise Optimierung vor, bei der zunächst für jede Zielgrößen eine optimale Einstellung der signifikanten Stellgrößen (Faktoren) gesucht wird. Exemplarisch werden *sequenzielle Optimierungsverfahren* wie die „Methode des steilsten Anstiegs“ oder das Simplexverfahren genannt.⁴⁹² *„Anschließend wird iterativ die optimale Einstellung der Faktoren ermittelt“*,⁴⁹³ wobei eine Kompromisslösung für alle interessierenden Zielgrößen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen gesucht wird. In Verifikationsversuchen muss dann die Gültigkeit der Ergebnisse unter möglichst realen Bedingungen überprüft werden.⁴⁹⁴ Die in der Konstruktionspraxis häufig angewandten Verfahren werden im folgenden Kapitel erläutert.

2.5.4 Vorhersage und Erprobung von Funktions- und Zustandseigenschaften

Unter dem Stichwort „Eigenschaftsanalyse“ werden in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur verschiedene empirische und theoretische Verfahren diskutiert, die eine frühzeitige Vorhersage und Erprobung der aus

⁴⁸⁸ vgl. Gundlach 2004 S.238

⁴⁸⁹ Kleppmann 2007 S.486

⁴⁹⁰ Gundlach 2004 S.243

⁴⁹¹ Gundlach 2004 S.239

⁴⁹² vgl. Kleppmann 2011 S.263ff.

⁴⁹³ Gundlach 2004 S.239

⁴⁹⁴ vgl. Gundlach 2004 S.242

Gestaltungsideen resultierenden Funktions- und Zustandseigenschaften eines Produkts ermöglichen. LINDEMANN stellt fest: *„Die Eigenschaftsanalyse ist ein wichtiger Schritt, um Aussagen über ein System hinsichtlich der Zielerreichung beziehungsweise Anforderungserfüllung treffen zu können.“*⁴⁹⁵ Er bezieht sich dabei auf die Nutzung von Erfahrungswissen sowie von experimentellen und numerischen Verfahren, die eine Vorhersage von Produkteigenschaften und eine Bewertung verschiedener Alternativen zum Zweck der Auswahl der besten Lösung ermöglichen. In Anlehnung an die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen, statistischen Verfahren unterscheidet er zwischen voll- und teilfaktoriellen Untersuchungen, bei denen die für eine Zielgröße interessierenden Einflussgrößen in allen bzw. nur in einigen besonders relevanten Ausprägungen variiert werden (z. B. um den Aufwand zu reduzieren).⁴⁹⁶

Zur Planung und Umsetzung einer Eigenschaftsanalyse werden nach WEBER Methoden und Modelle benötigt, *„die eine Vorhersage der jeweils interessierenden Eigenschaften erlauben. Solche Modelle können physische Prototypen sein, häufig [...] werden aber (besonders in den frühen Phasen der Produktentwicklung) abstrahierte mathematische Ersatzmodelle verwendet.“*⁴⁹⁷ Sie ermöglichen es, *„mithilfe von analytischen oder numerischen Rechenverfahren (wie z. B. FEM im Falle der Eigenschaft „Festigkeit/Steifigkeit“)*“ Funktions- und Zustandseigenschaften eines Produkts oder Teilsystems vorherzusagen oder zu optimieren.⁴⁹⁸

Eine wesentliche Voraussetzung für die Modellbildung ist, dass die *„für Ziel und Randbedingungen relevanten – konstruktiven – Parameter und ihre funktionalen Zusammenhänge“* grundsätzlich bekannt sind.⁴⁹⁹ WEBER schlägt vor, sie anhand von Vorversuchen, *„einfachen Regeln, Erfahrungswissen oder Intuition“*⁵⁰⁰ abzuschätzen und vorzubewerten. Geeignete Methoden und Modelle wurden dazu bereits in Kapitel 2.5.2 vorgestellt.

Während bereits in einer sehr frühen Phase der Entwicklung erfahrungsbasierte Prognosemethoden eingesetzt werden können (vgl. Kapitel 2.1.2 und 2.2.3), ist der Einsatz von Versuchen sowie Simulationsexperimenten erst dann sinnvoll, wenn die konstruktionsrelevanten Wirkzusammenhänge grundsätzlich bekannt sind. Ziel ist es dabei, bestmögliche Einstellungen zu ermitteln bzw. das aus einer gewählten Gestaltungslösung resultierende Bauteil- und Produktverhalten unter definierten

⁴⁹⁵ vgl. Lindemann 2009a S.49

⁴⁹⁶ vgl. Lindemann 2009a S.163

⁴⁹⁷ Weber 2001

⁴⁹⁸ Weber 2001

⁴⁹⁹ vgl. Prüfer 1982 S.2

⁵⁰⁰ Weber 2001

Randbedingungen zu erproben bzw. zu prognostizieren, um die Erkenntnisse anschließend in die Konstruktion zurück zu spiegeln (Test-based-Development).⁵⁰¹

Dass eine solche Erprobung und Vorhersage von Produkteigenschaften immer unter Berücksichtigung der relevanten Umgebungs-Systeme erfolgen muss, zeigen ALBERS et al. in ihren Arbeiten zu X-in-the-Loop durch die Koppelung virtuell-numerischer Ersatzmodelle mit physisch-realen Prototypen in Prüfstandsversuchen.⁵⁰² Nach ALBERS und WEBER sollten dabei (je nach Möglichkeiten) alle relevanten Eigenschaften der Umgebungs-Systeme, also auch deren Verhalten und ihre Wechselwirkungen realitätsnah nachgebildet werden.⁵⁰³

Bei einer theoretischen oder virtuellen Eigenschaftsanalyse muss zunächst die Voraussetzung erfüllt sein, dass die grundlegenden Wirkzusammenhänge dieser Eigenschaften bereits bekannt und in Modellen beschrieben sind. Die Auswahl eines geeigneten, auf diesen Modellen beruhenden Berechnungs- bzw. Simulationsverfahrens wird zum einen von der zugrunde liegenden Problemstellung und zum anderen *„durch die Art des mathematischen Modells und seine Eigenschaften beeinflusst. Typisch für Konstruktionsaufgaben ist die Nichtlinearität der funktionalen Beziehungen, welche die Verfahrensauswahl erheblich erschwert.“*⁵⁰⁴ Typisch ist auch, dass beim Konstruieren oft nicht nur einzelne Funktions- oder Zustandseigenschaften verbessert, sondern mehrere verschiedenartige Ziele bzw. Anforderungen erreicht werden sollen. Viele Simulations- und Berechnungsverfahren sind jedoch auf einzelne (Klassen von) Eigenschaften spezialisiert. Indem verschiedene Optimierungsstrategien zu multikriteriellen Berechnungsverfahren kombiniert werden, können dennoch mehrere unterschiedliche Eigenschaften behandelt werden. *„In diese Gruppe von DfX-Systemen gehören im Prinzip die schon seit längerem bekannten Parameteroptimierungsverfahren einschließlich [...] genetischer Algorithmen“.*⁵⁰⁵ Diese Verfahren werden jedoch weniger in der hier adressierten Entwurfsphase, sondern eher in einer späteren Phase der Produktentwicklung im Rahmen der Ausgestaltung eines ausgewählten Lösungsprinzips angewendet. In der vorhergehenden Entwurfsphase verfolgen Konstrukteure anstelle optimaler Gestaltvorschläge eher das Ziel, mit einfacheren Mitteln *„zufrieden stellende Lösungen unter akzeptablem Aufwand zu entwickeln, als ideale Lösungen.“*⁵⁰⁶

⁵⁰¹ vgl. Albers 2015a

⁵⁰² vgl. Albers 2008b, Düser 2010, Albers 2014b, Albers 2014c

⁵⁰³ vgl. Weber 2001, Albers 2008b, Albers 2014a

⁵⁰⁴ Prüfer 1982 S.2f.

⁵⁰⁵ vgl. Weber 2001

⁵⁰⁶ Bender 2004 S.233

Ein gemeinsamer Vorteil von erfahrungsbasierten Prognoseverfahren, Berechnungen und Simulationen ist die „Möglichkeit, risikolos Erfahrungen zu sammeln und Einflussfaktoren aufwandsarm zu variieren“.⁵⁰⁷ Zum anderen können die Modelle wiederverwendet und Ergebnisse – zumindest mit deterministischen Algorithmen – reproduzierbar erzeugt werden.

Eine Interpretation der Ergebnisse müsse nach PRÜFER immer vor dem Hintergrund der bei der Modellbildung getroffenen Annahmen und Randbedingungen durchgeführt werden.⁵⁰⁸ Die Ergebnisse sollten außerdem prinzipiell „durch Versuche an realen Bauteilen verifiziert werden“,⁵⁰⁹ um sicherzugehen, dass die vorhergesagten Funktions- und Zustandseigenschaften unter den angenommenen Randbedingungen realistisch sind. LINDEMANN⁵¹⁰ unterscheidet hierbei zwischen

- orientierenden Versuchen, anhand derer bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Entwicklung „wesentliche Eigenschaften grob ermittelt und dabei wertvolle Erkenntnisse gesammelt werden“ können,
- Testversuchen mit prototypischen Bauteilen oder Baugruppen unter realitätsnahen Einsatzbedingungen, sowie
- abschließenden Feldversuchen unter realen Einsatzbedingungen, bevor ein Produkt im Markt eingeführt wird.

Die Vor- und Nachteile von Versuchen mit Prototypen fasst LINDEMANN wie folgt zusammen: „Versuche mit Prototypen ermöglichen meist sehr konkrete Aussagen, da in diesem Fall wesentlich geringfügigere Vereinfachungen gegenüber dem Einsatz in der Realität vorgenommen werden, als dies zum Beispiel bei analytischen oder numerischen Analyseverfahren der Fall ist. Die Nachteile von Versuchen liegen neben den höheren Kosten und einer zum Teil stärkeren Umweltbelastung in der begrenzten Flexibilität der Versuchsobjekte. Zudem können nicht immer alle Störgrößen berücksichtigt werden. Sollen verschiedene Alternativen einer Lösung getestet werden, zieht dies meist aufwendige Änderungen am Prüfling, bis hin zu Neuanfertigungen, nach sich. Außerdem können Versuche oft nicht unter vollständig realen Bedingungen durchgeführt werden. Hier kann eine Mischform zwischen Versuch und Simulation Abhilfe schaffen.“⁵¹¹ Solche Mischformen vereinigen die Vorteile von Versuchen und Simulationen in sich, indem beispielsweise das Verhalten eines realen Bauteils oder Teilsystems mit einer simulierten Regelungselektronik in einer simulierten Umgebung untersucht wird. Für eine

⁵⁰⁷ Lindemann 2009a S.165

⁵⁰⁸ vgl. Prüfer 1982 S.3

⁵⁰⁹ Lindemann 2009a S.166

⁵¹⁰ vgl. Lindemann 2009a S.167

⁵¹¹ Lindemann 2009a S.167

vertiefte Erläuterung dieser Verfahren sei auf das von ALBERS et al. entwickelte „X-in-the-Loop-Framework“ (XiL) verwiesen.⁵¹²

2.5.5 Zwischenfazit

Die Inhalte der vorangegangenen Teilkapitel beziehen sich nicht nur auf Arbeiten aus der klassischen Konstruktionsmethodik, sondern zum Teil auch aus der Softwaretechnik (in Kapitel 2.5.1), der Informatik (in Kapitel 2.5.4) und der Statistik (in Kapitel 2.5.3). Dies bringt zum Ausdruck, dass in der Literatur bereits verschiedene (teils fachlich anspruchsvolle, aber weitgehend universell einsetzbare) Methoden beschrieben sind, die einen geschulten Anwender beim Lösen eines Gestaltungsproblems durch Analyse der relevanten Wirkzusammenhänge unterstützen:

Tabelle 2-6: Aktivitäten und korrespondierende Methoden zum Lösen von Gestaltungsproblemen

Aktivitäten beim Lösen eines Gestaltungsproblems	Unterstützende Methoden und Modelle
Randbedingungen, Einfluss- und Zielgrößen ermitteln und bewerten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschreibung von Anwendungs- und Testfällen ▪ Ziel- und Einflussgrößenanalyse ▪ Contact and Channel Approach (C&C²-A) ▪ Strukturgleichungsmodelle ▪ Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa) ▪ Screening Versuche
Hypothesen über Wirkzusammenhänge bilden	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contact and Channel Approach (C&C²-A) ▪ Characteristics Properties Model (CPM) ▪ Strukturgleichungsmodelle ▪ Inter-Domain- und Multiple-Domain-Matrizen ▪ Graphen und Portfolios
Hypothesen überprüfen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Statistische Versuchsplanung (DoE) ▪ Berechnungen, Simulationsexperimente ▪ multivariate mathematische Analyseverfahren
Gestaltungsideen deduktiv entwickeln	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schlussfolgerungen aus Messdaten, Diagrammen, Tabellen, Formeln etc. ▪ Variation der Gestalt ▪ Sequenzielle und multikriterielle Optimierungsverfahren ▪ Parameteroptimierung
Erprobung der Gestaltungsideen, Vorhersage der resultierenden Produkteigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfahrungsbasierte Prognosen, Schätzen ▪ Versuche (DoE, HiL, etc.) ▪ Berechnungen, Simulationsexperimente

⁵¹² vgl. Albers 2008b, Düser 2010

Für eine durchgängige methodische Unterstützung dieser Konstruktionsaktivitäten müssen Methoden aus verschiedenen Fachbereichen miteinander kombiniert werden. Sie erfordern beispielsweise eine speziell vertiefte Methodenkompetenz für statistische Versuchsplanung, multivariate Analyseverfahren und multikriterielle Optimierungsverfahren (vgl. Tabelle 2-6). Aus konstruktionsmethodischer Sicht existiert bislang keine Systematik, die eine äquivalente und durchgängige Unterstützung beim Lösen von Gestaltungsproblemen anbieten kann.

In der Konstruktionspraxis ist es aus diesem Grund erforderlich, dass Systemkonstrukteure über eine fächerübergreifende Methodenkompetenz verfügen. Im einfachsten Fall ist ein Konstruktionsteam mit mehreren Methodenexperten fachlich gemischt besetzt, d. h. es findet eine enge Zusammenarbeit von Systemkonstrukteuren und Validierungsingenieuren statt. Sollte dies nicht möglich sein, müssen die existierenden Methoden einem Systemkonstrukteur zumindest bekannt sein – und er muss willens und in der Lage sein, die zum Teil anspruchsvollen und fachfremden Methoden anzuwenden. In Kapitel 2.1.3 wurde bereits festgestellt, dass dies nicht generell vorausgesetzt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit soll diese Problemsituation aufgegriffen werden, indem geeignete Kombinationen von Methoden und Modellierungstechniken vorgeschlagen werden, mit denen Systemkonstrukteure eine qualitative und quantitative Analyse von Wirkzusammenhängen durchführen können.

2.6 Schlussfolgerungen zum Stand der Forschung

I. Lösen von Gestaltungsproblemen beim Konstruieren

Konstruieren ist eine der zentralen Tätigkeiten in der Produktentwicklung. Eine typische Problemsituation ist die Entwicklung von Ideen zur Gestaltvariation in der Produktgenerationsentwicklung.⁵¹³ Dazu müssen die funktionsbestimmenden Stellgrößen ermittelt und Ihre Ausprägung so definiert werden, dass sie den vielfältigen und teils widersprüchlichen Anforderungen an ein Produkt gerecht werden (vgl. Kapitel 2 Einleitung).⁵¹⁴ WIEDNER stellt fest: *„Dabei können winzige, scheinbar unwichtige Details zu Alleinstellungsmerkmalen und damit Wettbewerbsvorteilen gegenüber anderen Unternehmen führen.“*⁵¹⁵

Die Komplexität des Konstruierens stellt hohe Anforderungen an die mentale Leistungsfähigkeit, die Kreativität und die systematische Arbeitsweise von

⁵¹³ vgl. Kapitel 2.1.2

⁵¹⁴ vgl. Pahl & Beitz 2005 S.51ff.

⁵¹⁵ Wiedner S.8

Konstrukteuren.⁵¹⁶ Sie wählen je nach Problemlage, Bedarfssituation und Reifegrad der bereits erreichten Erkenntnisse bzw. Lösungen geeignete Methoden und Modelle zur Unterstützung aus und kombinieren sie mit ihren persönlich präferierten Denk- und Handlungsstrategien.⁵¹⁷

Neben spontanen, intuitiv-assoziativen Lösungsvorschlägen spielt in einem effizienzorientierten Unternehmensumfeld vor allem auch ein korrigierendes Vorgehen sowie

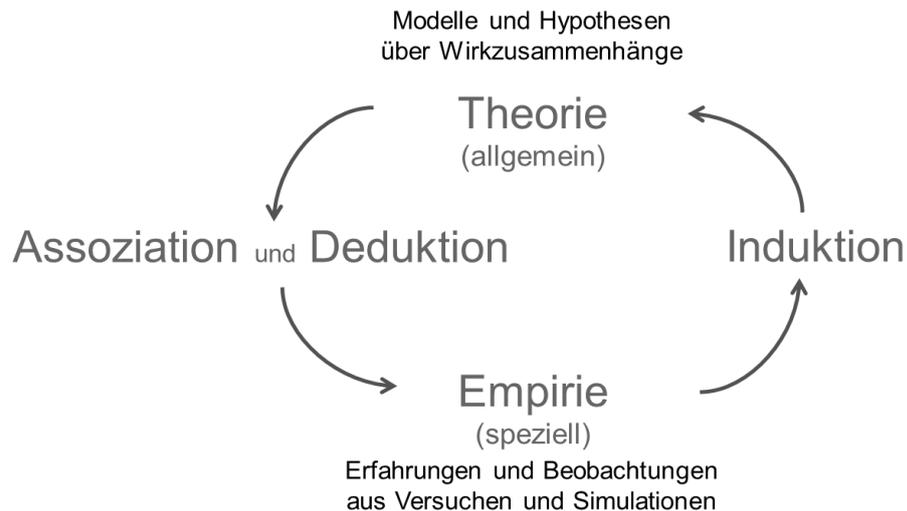


Abbildung 2.20: Induktiv-deduktives Vorgehen beim Lösen von Gestaltungsproblemen

ein systematisches, induktiv-deduktives Denken und Handeln eine wichtige Rolle. Dies beinhaltet eine sorgfältige Analyse und eine begründete Synthese von Lösungsvorschlägen aus den gewonnenen Erkenntnissen. Ebenso ist dafür aber auch ein ständiger Wechsel zwischen Empirie und Theorie erforderlich, um neue Erkenntnisse in Modellen und Hypothesen aufzunehmen und in Systemverständnis bzw. Gestaltungsideen umzusetzen (siehe Abbildung 2.20).

Demgegenüber steht die Beobachtung des Autors, dass die Synthese von Prinzip und Gestalt in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur als ein vorwiegend assoziatives Vorgehen diskutiert wird. ROOZENBURG bekräftigt diese These mit dem Hinweis, dass die Synthese noch wenig methodengeleitet, sondern „*weitgehend von den kreativen Fähigkeiten und Eingebungen der Konstrukteure abhängig*“ sei.⁵¹⁸ ROOZENBURG betont damit den Bedarf für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten, die eine induktiv-deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen unterstützen.

⁵¹⁶ vgl. Albers 2011a

⁵¹⁷ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.417ff., Eckert 2010

⁵¹⁸ Roozenburg 1995

II. Charakteristika geeigneter Konstruktionsmethoden

Konstruktionsmethoden sollten nicht einen vorschreibenden Charakter haben, sondern die Erfahrungen und Fähigkeiten von Konstrukteuren unterstützen, indem sie in schwierigen Situationen als ergänzende Hilfestellung „*die Leistungs- und Erfindungsfähigkeit steigern*“.⁵¹⁹ Anwendungsbarrieren von Konstruktionsmethoden in der Praxis müssen in der Forschung besonders berücksichtigt werden, darunter:⁵²⁰

- Die Notwendigkeit, konkrete Bedarfs- und Problemsituationen zu adressieren.
- Den Anspruch, eine nachweisliche, operative Unterstützung bei der Erarbeitung neuer Erkenntnisse und Lösungen zu leisten.
- Die Berücksichtigung individueller Methodenkompetenzen, Denk- und Handlungsmuster, Erfahrungswissen etc.
- Die Verwendung etablierter Begrifflichkeiten, eine übersichtliche Strukturierung und eine anwendungsnahe Formulierung der Vorgehensempfehlungen.

Wesentlicher Bestandteil einer methodischen Unterstützung beim Lösen von Gestaltungsproblemen ist eine Anleitung zur Modellbildung. Modelle bestimmen entscheidend mit, auf welche Weise Informationen gewonnen, verarbeitet, kommuniziert und dokumentiert werden.⁵²¹ Explizite Modelle unterstützen Konstrukteure, indem sie individuelle mentale Modelle auf eine gemeinsame Basis zurückführen,⁵²² das Arbeitsgedächtnis entlasten und Reflexionsprozesse unterstützen.⁵²³ Neben grafischen Modellen, die das Vorstellungsvermögen besonders gut ansprechen,⁵²⁴ werden in der Konstruktionswissenschaft häufig Matrizen, Portfolios, Cluster- oder auch Pfad-Diagramme vorgeschlagen,⁵²⁵ um konstruktionsrelevante Zusammenhänge darzustellen.

III. Potenziale und Barrieren bei der Modellierung von Funktion und Gestalt

Einer dieser für die Konstruktion zentralen Zusammenhänge ist die in Kapitel 2.3 beschriebene Relation zwischen der Gestalt und den Funktionen eines Produkts. Mithilfe der Modellvorstellung von *Wirkflächenpaaren* und *Leitstützstrukturen* lässt sich dieser Zusammenhang von Funktion und Gestalt beschreiben und in *Contact and Channel Modellen* sogar grafisch visualisieren.⁵²⁶ Durch die Beschreibung der Wirk-Struktur eines Produkts fokussiert ein Konstrukteur auf die

⁵¹⁹ Pahl & Beitz 2005 S.10

⁵²⁰ vgl. Kapitel 2.1.3

⁵²¹ vgl. Kläger 1993 S.24

⁵²² vgl. Birkhofer 2003

⁵²³ vgl. Hacker 2002 S.63ff.

⁵²⁴ vgl. Eckert 2010

⁵²⁵ vgl. Lindemann 2009b S.43ff.

⁵²⁶ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Albers 2014a

funktionsbestimmenden Bereiche der Produktgestalt. Funktionsbestimmend sind nach ALBERS und MATTHIESEN „*allein die Eigenschaften und Wechselwirkungen*“ der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen,⁵²⁷ die den an der Funktionserfüllung beteiligten Komponenten und (Teil-)Systemen zugeordnet werden können. Die jeweiligen Eigenschaften und Wechselwirkungen werden in Contact and Channel Modellen jedoch nicht explizit beschrieben. Die Modelle beschränken sich bisweilen auf die Visualisierung von Wirkflächenpaaren, Leitstützstrukturen und Connectoren sowie eine qualitative Beschreibung der beobachteten oder geforderten Funktionen (vgl. Abbildung 2.7 in Kapitel 2.3.3). Sie werden gebildet, um „*als Leitfaden beim Denken zu dienen*“;⁵²⁸ ein Leitfaden, mit dem ein qualitatives Systemverständnis erreicht werden kann.⁵²⁹ Eine quantitative Modellbildung wird mit Contact and Channel Modellen bislang nicht unterstützt. Konstrukteure müssen dazu auf andere, ergänzende Methoden und Modelle zurückgreifen.

Die in Kapitel 2.4 erläuterten Forschungsarbeiten zu Produkteigenschaften behandeln den Funktions-Gestalt-Zusammenhang aus einer ergänzenden Perspektive. HUBKA beschreibt verschiedene Arten von Produkteigenschaften⁵³⁰ und bildet damit auf der erkenntnistheoretischen Ebene eine wichtige Grundlage für anwendungsorientierte entwicklungsmethodische Arbeiten, beispielsweise von WEBER oder ROOZENBURG.⁵³¹ Deren Stärke liegt in der Universalität ihrer Erklärungsmodelle und einem hohen Detaillierungsgrad bei der Beschreibung von Wirkzusammenhängen. Ihre Schwäche liegt dafür jedoch in der abstrakten und mit zunehmendem Informationsgehalt schnell unübersichtlichen Modellbildung,⁵³² die in ihrer grafischen Darstellung nicht unmittelbar auf den Konstruktionsgegenstand bezogen ist. Produkteigenschaften und ihre Einflussbeziehungen werden isoliert von korrespondierenden Wirk-Strukturen beschrieben, d. h. eine Bezugnahme auf Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen in den vernetzten Dimensionen Material / Komponente / technisches (Teil-)System / (sozio-)technisches System findet bislang nicht statt.⁵³³ Eine Kombination der sich ergänzenden Arbeiten zum Contact and Channel Approach und zum CPM-Ansatz eröffnet jedoch das Potenzial, eine Systematik zur Beschreibung von Funktions-Gestalt-Zusammenhängen zu schaffen, mit der Wirkzusammenhänge bis auf die Ebene einzelner Produkteigenschaften erklärt und qualitativ modelliert werden können.⁵³⁴

⁵²⁷ vgl. Albers 2008b, Matthiesen 2002 S.54

⁵²⁸ Matthiesen 2002 S.2

⁵²⁹ vgl. Thau 2013 S.20f. & S.135

⁵³⁰ vgl. Hubka 1984

⁵³¹ vgl. Weber 2000, Roozenburg 2002

⁵³² vgl. Köhler 2009 S.108f.

⁵³³ vgl. Weber 2014 S.344

⁵³⁴ vgl. Weber 2012

Für eine Modellierung von Produkteigenschaften werden in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur Pfaddiagramme und Matrizen empfohlen.⁵³⁵ Die genannten Arbeiten gehen jedoch lediglich auf eine qualitative Form der Modellbildung von bereits bekannten Wirkzusammenhängen ein, wobei Einflussbeziehungen mit Symbolen wie „X“ oder numerischen Bewertungsskalen (z. B. „von 1 bis 5“) gekennzeichnet werden. Dem gegenüber stehen Potenziale quantitativer Modellierungstechniken zur Ermittlung unbekannter Wirkzusammenhänge, die THAU wie folgt zusammenfasst:

- *„Mit der Bestimmung der Funktions- und Gestalteigenschaften können qualitative Zusammenhänge quantifiziert und die Relevanz der einzelnen Gestaltfunktionselemente für eine Funktion bestimmt werden.*
- *Es können Gestalteigenschaften (Geometrie, stoffliche Eigenschaften) bewusst verändert werden, um die Funktionseigenschaften zu verbessern. Beim rein qualitativen Verständnis können nur Wirkflächenpaare hinzugefügt oder eliminiert werden.*
- *Anhand quantitativer Daten zu den Gestalt- und Funktionseigenschaften können mithilfe mathematischer Methoden (z. B. Korrelationsanalyse) Zusammenhänge zwischen Funktion und Gestalt bestimmt werden, ohne dass dieser Zusammenhang qualitativ bekannt ist. Es kann also auch durch die quantitative Verknüpfung auf qualitative Zusammenhänge geschlossen werden.“⁵³⁶*

Die in Kapitel 2.5 genannten Arbeiten geben Hinweise darauf, wie Wirkzusammenhänge ermittelt, quantifiziert und analysiert werden können. Die weitgehend universell einsetzbaren Verfahren unterstützen einen geschulten Anwender dabei, die für ein Gestaltungsproblem ursächlichen Einflussgrößen und Zielgrößen sowie ihre Beziehungen untereinander zu bestimmen und quantitativ zu beschreiben. Vor dem Hintergrund der Ausbildungs- und Tätigkeitsschwerpunkte von Systemkonstruktoren kann jedoch eine ausgeprägte Methodenkompetenz für diese teils anspruchsvollen Analyseverfahren nicht allgemein vorausgesetzt werden.⁵³⁷

Die Herausforderung der vorliegenden Arbeit besteht daher darin, Systemkonstruktoren geeignete Methoden und korrespondierende Formen der Modellbildung vorzuschlagen, mit denen sie eine Unterstützung bei der Analyse von Wirkzusammenhängen und der deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen erhalten können.

⁵³⁵ vgl. Weber 2000, Köhler 2009, Lindemann 2009b

⁵³⁶ Thau 2013 S.134f.

⁵³⁷ vgl. Kapitel 2.1.3

IV. Fazit

In einer Gesamtbetrachtung der in den Kapiteln 2.3, 2.4 und 2.5 genannten Theorien, Ansätze, Methoden, Verfahren und Modelle zeigt sich, dass in der Literatur eine bemerkenswerte Vielfalt von inhaltlich korrespondierenden Arbeiten verfügbar ist, die sich auf jeweils einzelne Aktivitäten einer Analyse multivariater Wirkzusammenhänge anwenden lassen. Für die vorliegende Arbeit ergibt sich daraus die Möglichkeit, das Potenzial einer Kombination dieser Methoden und Modelle für eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen zu untersuchen und Anregungen für eine sinnvolle Ergänzung des konstruktionswissenschaftlichen Portfolios zu geben.

3 Forschungsprofil der Arbeit

In diesem Kapitel wird aus den zuvor erläuterten Grundlagen das Forschungsprofil der Arbeit abgeleitet. Es umfasst die Benennung des Forschungsbedarfs, der wissenschaftlichen Zielstellung und die methodische Vorgehensweise der Arbeit.

3.1 Forschungsbedarf und Ziele der Arbeit

Die Produktgenerationsentwicklung ist dadurch charakterisiert, dass etablierte Lösungsprinzipien von Referenzprodukten weitgehend übernommen werden können. Differenzierungsmerkmale und das Innovationspotenzial einer neuen Produktgeneration werden maßgeblich davon bestimmt, dass durch Gestaltvariation die Leistungsfähigkeit und die Qualität der Funktionserfüllung gesteigert werden.⁵³⁸ Aus ökonomischen und risikoanalytischen Gründen werden dabei Vorgehensweisen bevorzugt, die einen möglichst geringen Änderungsaufwand erzeugen.

Die Entwicklungsmethodik unterstützt Systemkonstrukteure dabei, den kausalen Zusammenhang von Funktion und Gestalt in den Fokus ihrer Analyse- und Syntheseaktivitäten stellen – z. B. um funktionsbestimmende Stellgrößen zu ermitteln und daraus Ideen zur gezielten Gestaltvariationen abzuleiten. Ausgehend von einer *qualitativen* Problemfokussierung⁵³⁹ bieten entwicklungsmethodische Ansätze bislang jedoch kaum Unterstützung bei der *quantitativen* Analyse technischer Wirkzusammenhänge. Derartige Aktivitäten fallen in den Zuständigkeitsbereich statistischer Verfahren wie dem Design of Experiments (DoE) und der multivariaten Analysemethoden. Eine durchgehend deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen ist mithilfe von Entwicklungsmethoden bislang kaum möglich.

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, welche Möglichkeiten zur Behebung dieses Defizits bestehen:

Ziel dieser Arbeit ist die Formulierung eines Leitfadens zur deduktiven Gestaltvariation in der Produktgenerationsentwicklung. Hierzu sollen Methoden und Modellierungstechniken verknüpft werden, die eine Ermittlung und eine gezielte Variation der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter unterstützen.

Aus dieser Zielstellung ergeben sich zwei miteinander verknüpfte Teilziele:

⁵³⁸ vgl. Albers 2014a, 2015a

⁵³⁹ z. B. mithilfe des Contact and Channel Approach (C&C²-A) oder des Characteristics-Properties Modelling (CPM)

I. Quantitative Analyse multivariater Wirkzusammenhänge beim Konstruieren

In der Produktgenerationsentwicklung ist ein quantitatives Systemverständnis wichtig, um mithilfe von gezielten Modifikationen an den relevanten Stellgrößen das Produktverhalten zu verbessern (z. B. die Leistungsfähigkeit oder die Qualität der Funktionserfüllung) und Differenzierungsmerkmale zu Wettbewerbsprodukten zu schaffen. Häufig sind zu Beginn einer Produktgenerationsentwicklung diese Zusammenhänge jedoch nicht ausreichend bekannt. In der vorliegenden Arbeit soll daher aufgezeigt werden, wie beim Konstruieren die kausalen Wirkzusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Produktgestalt und dem in der Anwendung resultierenden Produktverhalten (den Funktionen und Eigenschaften) qualitativ beschrieben und quantitativ ausgewertet werden können. Dazu soll untersucht werden, wie durch korrigierende Variation der Gestalt- und Prozessparameter ein quantitatives Systemverständnis gefördert und die funktionsbestimmenden Stellgrößen ermittelt werden können:

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Empfehlungen zur qualitativen und quantitativen Modellierung technischer Wirkzusammenhänge, mit denen funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter ermittelt werden können.

II. Deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen zur gezielten Variation funktionsbestimmender Eigenschaften technischer Systeme

Für die Entwicklung von Gestaltungsideen werden in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur vorwiegend (Kreativitäts-)Methoden zur intuitiv-assoziativen Lösungssuche beschrieben. Dies fördert völlig neuartige Lösungsideen bei der Prinzip- und Gestaltvariation, zielt jedoch nicht unmittelbar auf die Vorteile einer Beibehaltung etablierter Lösungsprinzipien und der Ausschöpfung ihrer Potenziale zur Funktionserfüllung ab. Die vorliegende Arbeit verfolgt daher das Ziel, die kausalen Zusammenhänge von Funktion und Gestalt für eine deduktive Ableitung von Gestaltungsideen nutzbar zu machen – auf der Grundlage etablierter Lösungsprinzipien und eines detaillierten Systemverständnisses. Dazu soll untersucht werden, wie quantitativ modellierte Wirkzusammenhänge ausgewertet werden können, um neue Gestaltungsideen deduktiv zu entwickeln:

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Vorgehenssystematik für die Produktgenerationsentwicklung, die als Leitfaden zur Funktionsanalyse und zur deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen genutzt werden kann, um das Produktverhalten, d. h. die Leistungsfähigkeit und die Qualität der Funktionserfüllung, zu verbessern.

3.2 Forschungshypothesen

Die nachfolgend genannten Forschungshypothesen bilden, neben dem in Kapitel 2 erläuterten Stand der Forschung, die wissenschaftliche Grundlage für die vorliegende Arbeit. Sie werden unter der Annahme formuliert, dass die drei folgenden Voraussetzungen gültig sind:

- I. Die Kausalität der Zusammenhänge von Funktion und Gestalt.⁵⁴⁰
- II. Das Phänomen der bevorzugt hypothesengeleiteten Denk- und Handlungsstrategien von Konstrukteuren beim Lösen von Gestaltungsproblemen.⁵⁴¹
- III. Der Bedarf nach konstruktionsmethodischen Empfehlungen für eine induktiv-deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen.⁵⁴²

Auf dieser Grundlage werden die folgenden drei Forschungshypothesen formuliert:

Forschungshypothese 1: Analyse und Synthese verknüpfen

Die kausalen Zusammenhänge von Funktion und Gestalt ermöglichen ein durchgehend induktiv-deduktives Vorgehen von der Funktionsanalyse bis zur Synthese von Gestaltungsideen.

Forschungshypothese 2: Funktionsbestimmende Einflussgrößen ermitteln

Durch eine quantitative Modellierung der funktionsrelevanten Wirkzusammenhänge können diejenigen Gestalt- und Prozessparameter eines Referenzprodukts ermittelt werden, die einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und die Qualität der Funktionserfüllung haben.

Forschungshypothese 3: Gestaltungsideen deduktiv ableiten

Durch Variation der funktionsbestimmenden Einflussgrößen können Gestaltungsideen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Qualität der Funktionserfüllung eines Referenzprodukts deduktiv abgeleitet werden.

⁵⁴⁰ vgl. Kapitel 2.3.1 und 2.4.1

⁵⁴¹ vgl. Kapitel 2.2.2

⁵⁴² vgl. Roozenburg 2002, Weber 2012, Albers 2014a

3.3 Forschungsfragen

Die nachfolgend beschriebenen Forschungsfragen sind aus der Zielsetzung und den Forschungshypothesen der Arbeit abgeleitet. Sie dienen primär der operativen Fokussierung relevanter Inhalte der Untersuchungen und sind so angelegt, dass durch ihre Beantwortung ein Beitrag zur Überprüfung der Forschungshypothesen und zur Erreichung der Ziele der Arbeit geleistet wird. Sie lauten:

Forschungsfrage 1: Funktionsanalyse methodisch unterstützen

Welche konstruktionswissenschaftlichen Ansätze eignen sich für eine durchgehende Methodenunterstützung einer qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse? Welche Rückschlüsse ermöglichen diese Ansätze, um funktionsrelevante Gestalt- und Prozessparameter zu ermitteln?

Forschungsfrage 2: Wirkzusammenhänge quantifizieren

Welche Modellierungstechniken eignen sich für eine quantitative Beschreibung von Wirkzusammenhängen? Wie können mit diesen Modellierungstechniken einzelne funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter ermittelt werden?

Forschungsfrage 3: Gestaltungsideen deduktiv ableiten

Mit welchen Methoden und Modellen können Systemkonstrukteure aus einer Funktionsanalyse Gestaltungsideen deduktiv ableiten, die zu einer Verbesserung ausgewählter Funktionen und Funktionseigenschaften beitragen?

Forschungsfrage 4: Tragweite analysieren

Mit welchen Modellierungstechniken können Wirkzusammenhänge so beschrieben werden, dass es möglich ist, einzelne Gestaltungsideen auf mögliche Zielkonflikte bezüglich ihrer Auswirkungen auf sekundäre Funktionen und Funktionseigenschaften zu beurteilen?

3.4 Forschungsmethoden

Das methodische Vorgehen in der vorliegenden Forschungsarbeit wird maßgeblich von der bereits genannten Zielstellung, den zugrunde liegenden Hypothesen und den daraus abgeleiteten Forschungsfragen bestimmt. Sie sind bewusst so angelegt, dass die Forschungsarbeit nicht nur zum Zweck der Entstehung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse dient, sondern (vor allem) auch zur Entwicklung operativ nutzenstiftender Empfehlungen, die einen Beitrag zu neuen Produktinnovationen leisten können. Dementsprechend ist die Forschungsarbeit geprägt von einer Kombination aus theoretischen und empirischen Untersuchungen, die anhand von vertieften Literaturstudien zum Stand der Forschung und qualitativen Fallstudien in der Konstruktionspraxis durchgeführt wurden.

Die vorliegende Forschungsarbeit beruht sowohl auf einer ausführlichen Literaturstudie zum Stand der Forschung und Technik⁵⁴³ als auch auf qualitativ-empirischen Fallstudien in der Konstruktionspraxis.⁵⁴⁴ Über die Vorzüge und Nachteile theoretischer und empirischer sowie qualitativer und quantitativer Forschung ist in der Literatur bereits viel geschrieben worden. WIEDNER fasst die jeweiligen Argumente prägnant zusammen,⁵⁴⁵ sodass die Ziele, Stärken und Schwächen der einzelnen Forschungsmethoden an dieser Stelle nicht erneut gegenübergestellt und diskutiert werden müssen.

Der Bezug zu realen Konstruktionsprojekten im industriellen Umfeld ist für die vorliegende Arbeit von großer Bedeutung. Sie ermöglichen die Entwicklung neuer Erkenntnisse durch qualitative Forschung, d. h. teilnehmende Beobachtung, Dokumentenanalyse und Befragungen der beteiligten Konstrukteure in einem realen, industriellen Kontext. Die empirischen Fallstudien dienen somit als Plattform für

- die in Kapitel 4 beschriebene Reflexion und Verknüpfung der wissenschaftlichen und der wirtschaftlichen Bedarfssituationen,
- die (Weiter)Entwicklung und Erprobung der in Kapitel 5 vorgestellten Empfehlungen zur Methoden- und Modellnutzung, sowie für
- die in Kapitel 6 erläuterte Evaluierung der dadurch erzielten Konstruktions- und Forschungsergebnisse.

Die Struktur der Arbeit lässt sich in die von ECKERT et al. beschriebene „*Spiral of Applied Research*“⁵⁴⁶ und in die „*Research Design Methodology*“ von BLESSING und CHAKRABARTI einordnen.⁵⁴⁷ Ausgehend von einer präskriptiven, theoretischen

⁵⁴³ siehe Kapitel 2

⁵⁴⁴ Siehe Kapitel 4

⁵⁴⁵ Wiedner 2013 S.36ff.

⁵⁴⁶ vgl. Eckert 2003

⁵⁴⁷ vgl. Blessing & Chakrabarti 2009

Fallstudie zur Modellierung einer mechatronischen Produktarchitektur⁵⁴⁸ wurde in einer Vorstudie der relevanten Literatur (Research Clarification) der Stand der Forschung zum Lösen von Gestaltungsproblemen untersucht.⁵⁴⁹ Dadurch konnten der thematische Fokus und die Zielstellung der vorliegenden Arbeit eingegrenzt sowie die ersten Forschungsfragen formuliert werden.

In einer daran anschließenden, empirischen Fallstudie wurde qualitativ beobachtet, wie Systemkonstrukteure bei der Entwicklung einer neuen Produktgeneration bestimmte Methoden und Modelle zum Lösen von Gestaltungsproblemen einsetzen und welche Schwierigkeiten dabei auftreten können (Descriptive Study I).⁵⁵⁰ Der Autor betreute dazu als Methoden-Coach ein industrielles Konstruktionsprojekt, ohne selbst aktiv an den Konstruktionsarbeiten mitzuwirken. Aus den Beobachtungen wurden einerseits die Forschungsfragen präzisiert (Research Clarification). Andererseits lieferten parallel fortgeführte Literaturstudien erste Erkenntnisse zur quantifizierten Analyse von Wirkzusammenhängen beim Lösen von Gestaltungsproblemen.

Die aus diesen Beobachtungen und Literaturstudien abgeleiteten Erkenntnisse wurden im weiteren Verlauf der Arbeit (Prescriptive Study)

- theoretisch anhand von Forschungsgesprächen evaluiert und
- in Empfehlungen zur Anwendung von Methoden und Modellierungstechniken umgewandelt.

Diese Empfehlungen fanden Anwendung in weiteren deskriptiven und präskriptiven empirischen Fallstudien, die der Autor wiederum als wissenschaftlicher Beobachter in industriellen Konstruktionsprojekten betreute. Je nach Aufgabenstellung der Fallstudien konnten dadurch neue Anforderungen und Randbedingungen analysiert

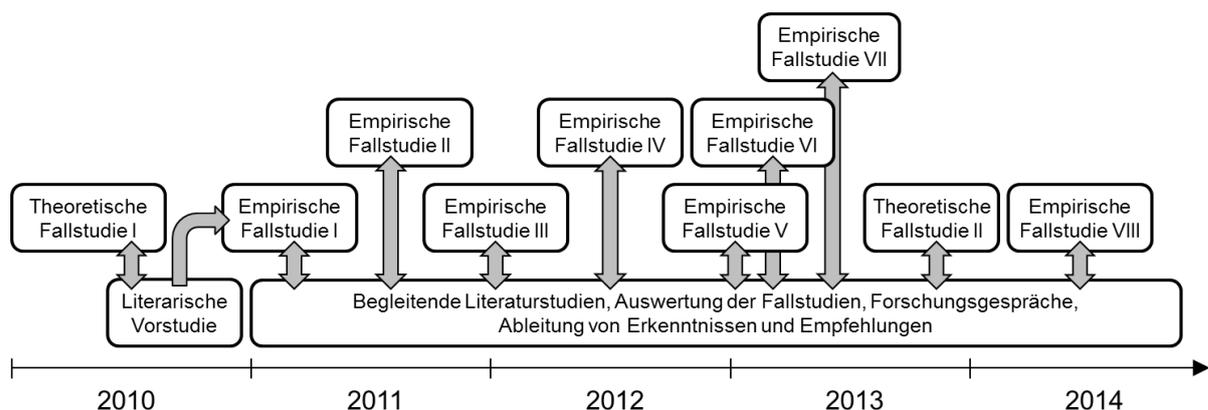


Abbildung 3.1: Methodisches Vorgehen und zeitlicher Verlauf der Forschungsarbeit

⁵⁴⁸ vgl. Albers 2011e

⁵⁴⁹ vgl. Zhang 2010 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁵⁰ vgl. Tian 2011 (betreute Abschlussarbeit)

sowie die bisherigen Erkenntnisse und Empfehlungen weiterentwickelt und erprobt werden. Im Verlauf der Forschungsarbeit wurden auf diese Weise insgesamt zwei theoretische und acht empirische Fallstudien in unterschiedlichen Unternehmen und Branchen durchgeführt. In Kapitel 4 werden die Charakteristika der Fallstudien und die daraus ermittelten Erkenntnisse näher erläutert.

Aus dieser Abfolge und Verknüpfung von Fallstudien und Literaturstudien ergab sich ein kontinuierlich fortgesetztes, iteratives Vorgehen aus empirischer und theoretischer Forschungsarbeit, das von präskriptiven, deskriptiven, induktiven und deduktiven Schritten geprägt war. Eine klare zeitliche Trennung dieser Schritte war in den Fallstudien nicht gegeben; vielmehr liefen die jeweiligen Analyse- und Syntheseschritte in der vorliegenden Forschungsarbeit (wie auch in der Produktentwicklung üblich) weitgehend parallel ab. Die einzelnen Fallstudien wurden zudem nicht sequenziell, sondern weitgehend parallel bzw. mit Überlappungen durchgeführt, was zu einer iterativen Weiterentwicklung und Validierung der Empfehlungen zur Methoden- und Modellanwendung beitrug. Die technischen Ergebnisse und methodischen Erkenntnisse aus abgeschlossenen Fallstudien wurden jeweils analysiert und die daraus abgeleiteten Empfehlungen in die nachfolgenden Fallstudien eingebracht. Die empirisch und theoretisch erarbeiteten Erkenntnisse konnten dadurch im stetigen Austausch mit Forschern und Entwicklungsingenieuren aus unterschiedlichen Fachbereichen erweitert, präzisiert und validiert werden.⁵⁵¹

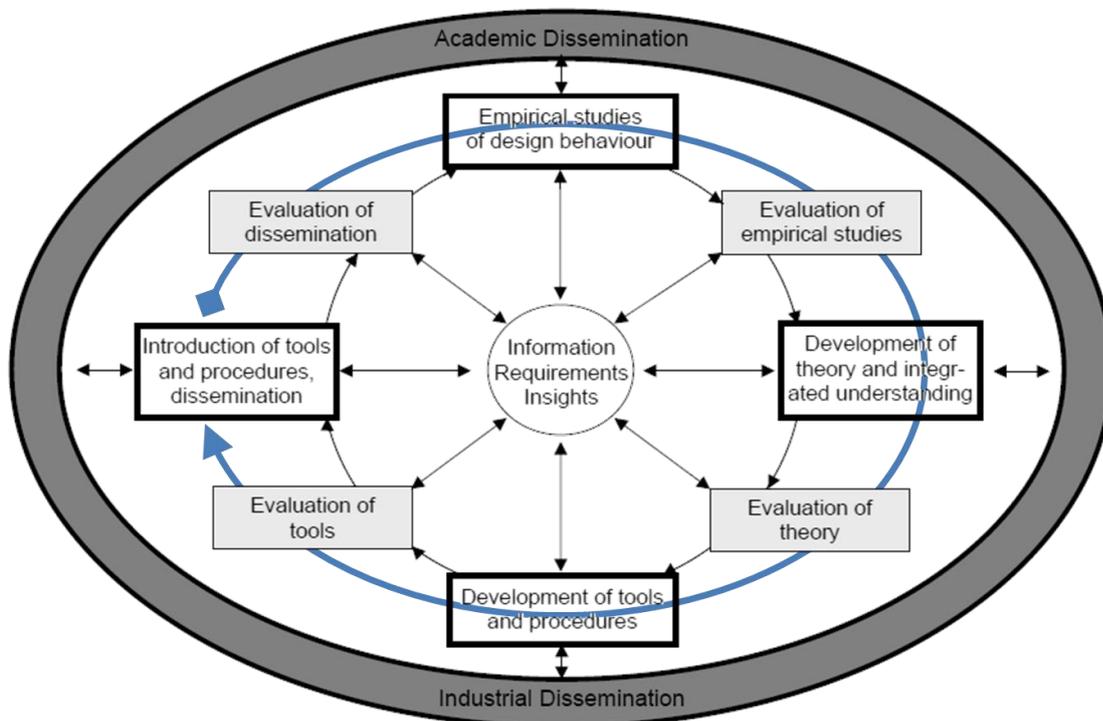


Abbildung 3.2: Einordnung der Vorgehensweise in die „Spiral of Applied Research“⁵⁵¹

⁵⁵¹ vgl. Eckert 2003

4 Beobachtungen aus empirischen Fallstudien in der Entwicklungspraxis

Im Verlauf der Forschungsarbeit wurden acht qualitativ-empirische Fallstudien in der Entwicklungspraxis durchgeführt. Anhand von Beobachtungen aus diesen Fallstudien wird in diesem Kapitel erläutert, welche methodischen Probleme bei der Bestimmung und der Analyse von funktionsrelevanten Wirkzusammenhängen bestehen. Die Erkenntnisse unterstützen die Ausrichtung der Forschungsarbeit an der bereits beschriebenen Forschungslücke⁵⁵² und an einer konkreten Bedarfssituation in der Konstruktionspraxis. Damit wird das Ziel verfolgt, neben neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen auch operativ nutzenstiftende Empfehlungen zu erarbeiten, die Systemkonstrukteure beim Lösen von Gestaltungsproblemen unterstützen.

Im folgenden Abschnitt werden dazu zunächst die Charakteristika der empirischen Fallstudien erläutert. Dabei wird ersichtlich, dass trotz unterschiedlicher technischer Problemstellungen jeweils ähnliche Herausforderungen bezüglich der Vorgehenssystematik und der Modellbildung bestehen können. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse werden im darauf folgenden Abschnitt in Form von methodischen Konstruktionsbarrieren formuliert, die durch die vorliegende Forschungsarbeit adressiert werden sollen. Sie konkretisieren den in Kapitel 3 formulierten Forschungsbedarf und die Zielstellung der vorliegenden Arbeit, indem sie Anforderungen und Randbedingungen beschreiben, die bei der Auswahl und Kombination geeigneter Methoden und Modelle für die Konstruktionspraxis zu berücksichtigen sind.

4.1 Charakteristika der empirischen Fallstudien

In den nachfolgenden Abschnitten werden die insgesamt acht empirischen Fallstudien vorgestellt, die im Kontext realer Konstruktionsprojekte bei sechs Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen im süddeutschen Raum durchgeführt wurden. Ziel der Untersuchungen war es einerseits, neue Erkenntnisse über methodische Herausforderungen bei Gestaltvariationen zu ermitteln. Andererseits bilden die Fallstudien eine Plattform für die Erprobung der in Kapitel 5 vorgestellten Methoden zur Funktionsanalyse und zur deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen in der Produktgenerationsentwicklung.

⁵⁵² siehe Kapitel 2.6

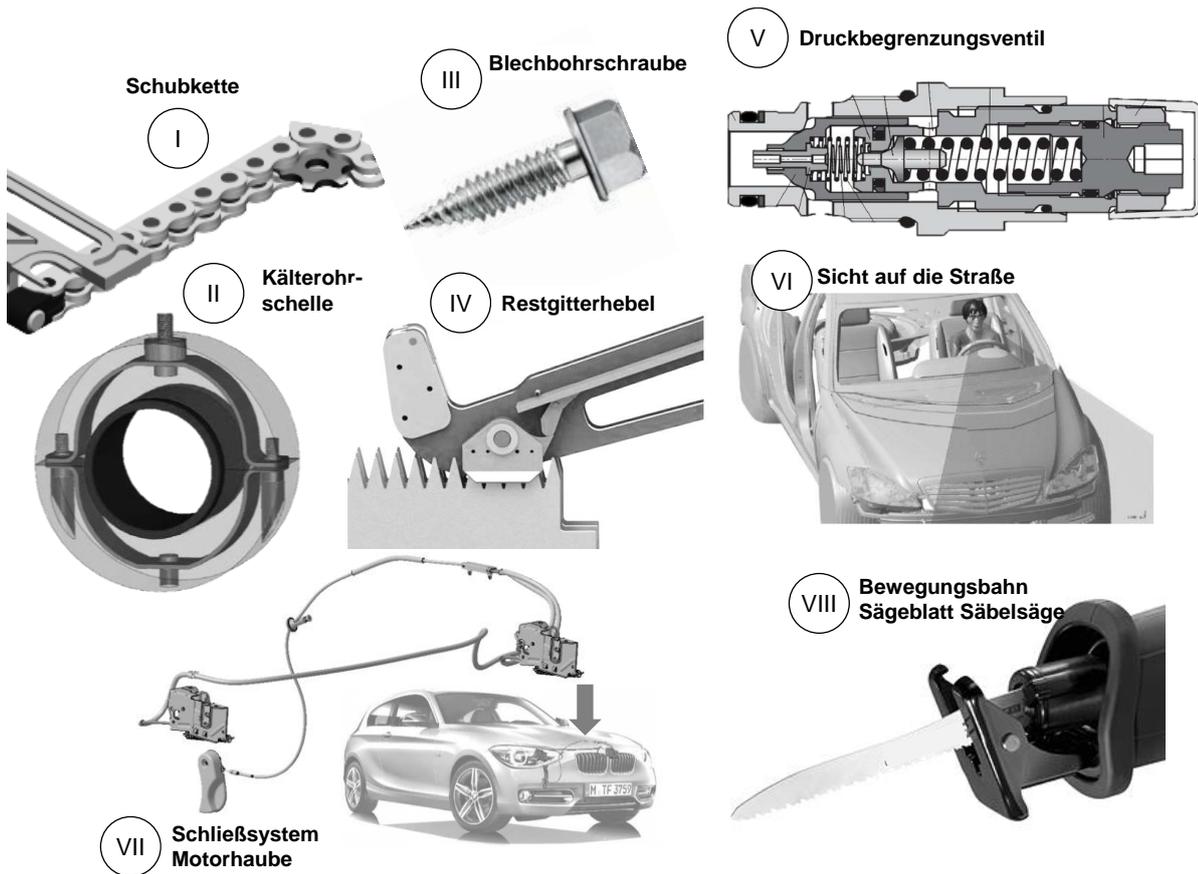


Abbildung 4.1: Referenzprodukte der in den Fallstudien I – VIII begleiteten Entwicklungsprojekte

4.1.1 Konstellationen und Motivationen der Beteiligten

Die Entscheidung zur Durchführung empirischer Fallstudien in der Konstruktionspraxis beruht auf der Motivation des Autors, eine reale Problemsituation in der Konstruktionspraxis zum Gegenstand der Forschung zu machen und Ergebnisse zu erarbeiten, die von Systemkonstruktoren nutzenstiftend eingesetzt werden können. Solche Problemsituationen können insbesondere durch teilnehmende Beobachtung, Dokumentenanalyse und Befragungen der beteiligten Konstrukteure in ihrem realen Entwicklungskontext untersucht werden.

Die empirischen Fallstudien sind jeweils dadurch charakterisiert, dass der Autor der vorliegenden Arbeit durch die Betreuung studentischer Abschlussarbeiten Zugang zu unternehmensinternen Entwicklungsprojekten erhielt, die jeweils von einer kleinen Expertengruppe (z. B. für Konstruktion, Simulation, Versuch, Produktion) hauptverantwortlich durchgeführt wurden. Durch den Projektcharakter der Abschlussarbeiten konnte jeweils über einen Zeitraum von vier bis sechs Monaten die vollständige Bearbeitung eines inhaltlich abgegrenzten Konstruktionsproblems beobachtet werden. Die aktive Ausführung der Konstruktionsarbeiten lag ausschließlich bei dem unternehmensinternen Entwicklungsteam. Die Beteiligung des Autors war charakterisiert durch eine teilnehmende Beobachtung und (je nach

Fallstudie) einer methodischen Beratung zur Überwindung epistemischer Unsicherheiten.⁵⁵³

- *Definitionslücken* bei der Spezifikation funktionaler Zielgrößen, sowie
- *Wissenslücken* bezüglich den funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparametern, die einen wesentlichen Einfluss auf diese Zielgrößen haben.

Im Gegensatz zu Laborstudien ist es bei der Durchführung solcher empirischer Untersuchungen im Kontext realer Entwicklungsprojekte möglich, die normale Arbeitsweise von Konstrukteuren zu beobachten. Andererseits kann durch die Einzigartigkeit und den individuellen Charakter von Produktentwicklungsprojekten⁵⁵⁴ eine Wiederholbarkeit und vollständige Vergleichbarkeit nicht gewährleistet werden. So war es beispielsweise nicht möglich, dieselbe Konstruktionsaufgabe unter variablen Rahmenbedingungen durchzuführen, z. B. durch verschiedene Personen oder unter Einsatz verschiedener Methodenkombinationen. Die Durchführung empirischer Fallstudien setzt außerdem eine freiwillige Kooperation der beteiligten Parteien voraus, bei der davon ausgegangen werden muss, dass die Konstellation und die individuelle Motivation einen Einfluss auf den Verlauf der Untersuchungen und deren Ergebnisse haben.

In der vorliegenden Forschungsarbeit beruht die Bereitschaft der Unternehmen zur Durchführung konstruktionsbegleitender Fallstudien nach Aussagen der Beteiligten einerseits auf der Motivation, Einblicke in aktuelle Forschungsarbeiten zu erlangen. Andererseits bieten Sie ihnen eine Gelegenheit, ihre methodischen Konstruktionsprobleme gezielt in die Untersuchungen einzubringen. Damit verbunden ist auch die Absicht, konstruktionsmethodische Beratungsleistungen in das jeweilige Entwicklungsprojekt einzubinden. Die Unternehmen partizipieren dadurch an der Weiterentwicklung der Konstruktionsmethodik und profitieren von wissenschaftlichen Erkenntnissen, die einen direkten Anwendungsbezug zu ihren Entwicklungsarbeiten haben. Das Modell dieser praxisnahen Forschung im Unternehmensumfeld ist charakteristisch für die Forschungsarbeiten von ALBERS et al., weil dadurch ein Bezug zu praxisrelevanten Themen im Forschungsprofil und eine Verifikation bzw. Validierung der Forschungsergebnisse unter direkter Mitwirkung von Systemkonstrukteuren in Unternehmen sichergestellt werden kann. Eine Übersicht über die personelle Zusammensetzung der Entwicklungsprojekte gibt Tabelle 4-1.

⁵⁵³ vgl. Hastings 2004 S.8; vgl. Lohmeyer 2013 S.90ff.

⁵⁵⁴ vgl. Albers 2011a

Tabelle 4-1: Personelle Konstellationen in den empirischen Fallstudien

Empirische Fallstudie (mit Literaturquellen)⁵⁵⁵	Referenzprodukt des Entwicklungsprojekts	Beobachtete Experten- gruppen im Unternehmen
I Tian 2011	Rückensteife Antriebskette / Schubkette	2 Konstrukteure, 1 Student
II Leiser 2011	Kälterohrschelle	1 Kundeningenieur, 2 Konstrukteure, 1 Student
III Stürtzel 2012	Blechbohrschraube	1 Validierungsingenieur, 2 Konstrukteure, 1 Student
IV Herzog 2012	Blechbearbeitungswerkzeug	1 Produktionsingenieur, 1 Konstrukteur, 1 Student
V Stemmler 2013	Hydraulisches Druckbegrenzungsventil	2 Validierungsingenieure, 1 Konstrukteur, 1 Student
VI Kubel 2013	Automobil-Windschutzscheibe	1 Konstrukteur, 1 Student
VII Gaede 2013	Schließsystem für Automobil- Motorhauben	1 Validierungsingenieur, 1 Konstrukteur, 1 Student
VIII Wall 2014	Säbelsäge für Holzarbeiten	1 Validierungsingenieur, 1 Konstrukteur, 1 Student

4.1.2 Ausgangssituationen und Zielstellungen

Die empirischen Fallstudien sind in den Entwicklungsprozessen der Unternehmen in einer Phase angesiedelt, in der ein funktionsfähiges Produktkonzept entwickelt werden soll, das anschließend fertigungstechnisch optimiert wird. Eine Kundenanfrage lag den Unternehmen zu diesem Zeitpunkt noch nicht vor, d. h. die Weiterentwicklung des jeweiligen Referenzprodukts war selbstmotiviert und ohne einen signifikanten Zeitdruck begonnen worden.

ALBERS bezeichnet die in den Fallstudien begleiteten Aktivitäten der Produktentstehung als *Projektierung, Profillindung, Ideenfindung, Modellierung von Prinzip und Gestalt, sowie Verifikation und Validierung*. Hierbei sind nicht einzelne Phasen eines Produktentstehungsprozesses, sondern die Aktivitäten der beteiligten Entwicklungsingenieure gemeint, wie sie von ALBERS im Integrierten Produktentstehungsmodell iPeM verwendet werden.⁵⁵⁶ Die Anteile der vom Autor begleiteten Entwicklungsaktivitäten sind zu Vergleichszwecken in Tabelle 4-2 qualitativ dargestellt:

⁵⁵⁵ (betreute Abschlussarbeiten)

⁵⁵⁶ vgl. Albers 2011b

Tabelle 4-2: Schwerpunkte der Entwicklungsaktivitäten in den empirischen Fallstudien I bis VIII

Fallstudie Nr.	Projektierung	Profilfindung	Ideenfindung	Modellierung von Prinzip und Gestalt	Verifikation und Validierung
I Rückensteife Antriebskette					
II Kälterohrschelle					
III Blechbohrschraube					
IV Blechbearbeitungs-Werkzeug					
V Druckbegrenzungs-Ventil					
VI Automobil Windschutzscheibe					
VII Schließsystem für Motorhauben					
VIII Säbelsäge					

Legende: ○ ≡ 0% ◐ ≡ 25% ◑ ≡ 50% ◒ ≡ 75% ● ≡ 100%

Ein sequenzieller Verlauf wird mit dieser Abbildung nicht impliziert; die Fallstudien waren vielmehr von einem iterativen Vorgehen bzw. Springen zwischen den dargestellten Aktivitäten charakterisiert. Der Schwerpunkt lag jeweils auf der Ideenfindung sowie der Modellierung von Prinzip- und Gestaltlösungen. Die Produktprofile und die zugehörigen initialen Zielsysteme der Entwicklungsprojekte lagen bereits in wesentlichen Teilen vor. Aktivitäten der Projektierung wurden in einem begrenzten Umfang, der zur Steuerung der Fallstudien erforderlich war, mit begleitet. Je nach Verfügbarkeit von Prüfstandseinrichtungen und Simulationsexperimenten wurde außerdem die Verifikation und Validierung von Hypothesen über Wirkzusammenhänge und von Gestaltungsideen begleitet.

Die technische Ausgangssituation in den Fallstudien I (rückensteife Antriebskette) und VII (Schließsystem für Automobil-Motorhauben) ist jeweils dadurch charakterisiert, dass die Entwicklung des Vorgänger- bzw. Referenzprodukts bereits mehrere Jahre zurück liegt. Ziel der Entwicklungsprojekte war es nun, für eine neue Produktgeneration die richtigen Gestaltungsideen zu generieren, um durch eine Verbesserung der Funktionserfüllung eine deutlichere Differenzierung von Wettbewerbsprodukten zu erreichen, beispielsweise bei der Leitungsfähigkeit, der Betriebssicherheit und der Ergonomie.

In Fallstudie II wurde das Referenzprodukt (eine Kälterohrschelle) von dem Unternehmen ursprünglich zugekauft und in eigene Lösungen integriert, ohne deren Funktionsweise bis ins Detail zu verstehen. Nun sollten diese Komponenten selbst weiterentwickelt werden, um die mechanischen und thermischen Eigenschaften signifikant zu verbessern und als Systemanbieter einen höheren Marktanteil erreichen zu können.

In Fallstudie III sollte eine Blechbohrschraube so weiterentwickelt werden, dass sie unter verschärften Randbedingungen (67% dickere Bleche mit einer um 33% reduzierten Anpresskraft der Anwender verschrauben) gesteigerte Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Montageperformance (z. B. geringere Ausfallrate und kürzere Montagezeit) erfüllen kann. Diese Ziele sollten durch eine angepasste Spezifikation der geometrischen Gestalteeigenschaften der Schraubenspitze erreicht werden. Ein detailliertes Verständnis der Zusammenhänge von Funktion und Gestalt musste erst erarbeitet werden, da für das Referenzprodukt keine ausreichende Dokumentation vorlag und die geometrische Gestalt aufgrund komplexer Fertigungsprozesse einer großen Streuung unterlag.

In Fallstudie IV war bereits ein Funktionsprototyp für ein neuartiges Blechbearbeitungswerkzeug aus einem Vorentwicklungsprojekt⁵⁵⁷ vorhanden. Die Ergebnisse sollten nun zur Serienreife ausgestaltet werden. Hierzu sollten zunächst jene Stellgrößen der Produktgestalt ermittelt werden, durch deren Variation eine Verbesserung der Betriebssicherheit, der Beanspruchbarkeit und der Ergonomie für ausgewählte Anwendungssituationen bei der Produktion von Blecherzeugnissen erreicht werden können.

Die Konstrukteure der Unternehmen sahen sich vor diesem Hintergrund mit der Frage konfrontiert: *„Warum hat das Referenzprodukt diese Gestalt und wie muss sie verändert werden, um die Qualität der Funktionserfüllung weiter zu verbessern?“*⁵⁵⁸

In Fallstudie V sollte ein etabliertes Verfahren zur automatisierten Funktionsprüfung eines hydraulischen Druckbegrenzungsventils für die Serienfertigung so verbessert werden, dass mit einem veränderten Prüfmedium (Stickstoff bzw. Druckluft) kürzere Prüfzyklen und ein geringerer Ressourceneinsatz realisiert werden können. Hierzu sollten die stofflichen und prozesstechnischen Einflussgrößen der Prüfverfahren miteinander verglichen und die Parameter des pneumatischen Prüfverfahrens so gewählt werden, dass eine Funktionsprüfung der Ventile im Produktionsprozess sicherer, schneller und günstiger möglich ist.

⁵⁵⁷ „Integrierte Produktentwicklung 2011/12“ von Albers et al.

⁵⁵⁸ sinngemäße Wiedergabe der Beobachtungen des Autors zur Charakterisierung der technischen Ausgangssituation in den Fallstudien I, II, III, IV und VII

In Fallstudie VI sah sich ein Automobilhersteller mit der Konfliktsituation konfrontiert, dass die Gestaltung moderner Fahrzeuge das Sichtfeld eines Fahrers auf die Straße zunehmend begrenzt, z. B. aufgrund von Verbesserungen bei der Aerodynamik, dem Design und durch gesetzliche Anforderungen an den Unfallschutz. Andererseits wird eine gute Sicht durch das ansteigende Verkehrsaufkommen und die komplexeren Verkehrssituationen auf den Straßen immer bedeutender. Durch eine geeignete Abstimmung von Bauraumkonturen des Cockpits und des Chassis sollten Gestaltungsideen zur Verbesserung der Sicht durch die Windschutzscheibe auf die Straße erarbeitet werden. Dieses Ziel sollte durch eine simulationsgestützte Funktionsanalyse auf Gesamtfahrzeugebene erreicht werden, mit der die Sichtverhältnisse ohne kostenintensive Prototypen objektiv beurteilt werden können.

In Fallstudie VIII war die Ausgangssituation durch die Einführung eines neuen Getriebekonzepts für eine neue Säbelsägen-Generation gekennzeichnet. Dadurch ergab sich die Möglichkeit (bzw. die Zielstellung für das Entwicklungsprojekt), die Bewegungsbahn des Sägeblatts so einzustellen, dass die Sägeleistung im Vergleich zum Vorgängerprodukt signifikant verbessert wird. Weder in der Literatur noch im Unternehmen selbst waren jedoch Informationen über die Wirkzusammenhänge im Sägespalt und den Einfluss der Bewegungsbahn des Sägeblatts auf die Schneidleistung verfügbar. Das Ziel des Projekts bestand daher zunächst in der Ermittlung und anschließend in der Optimierung der funktionsbestimmenden Prozessparameter zur Verbesserung der Sägeleistung.

Zusammenfassend war die technische Ausgangssituation der in den Fallstudien beobachteten Konstruktionsarbeiten dadurch charakterisiert, dass grundlegende Komponenten und Wirkprinzipien bereits festgelegt bzw. durch Referenzprodukte vorgegeben waren. Als Ziel wurde jeweils die Verbesserung der dadurch bereits grundsätzlich realisierten Funktionen und Funktionseigenschaften angestrebt. Dazu sollte zunächst ein umfassendes Systemverständnis darüber entwickelt werden, welche geometrischen, stofflichen und prozesstechnischen Stell- und Störgrößen die betrachteten Funktionen und Funktionseigenschaften der Referenzprodukte beeinflussen. Ausgehend von diesen Erkenntnissen über die funktionsrelevanten Wirkzusammenhänge sollte eine Einschätzung getroffen werden, in welchen Bereichen der Wirk-Struktur signifikante Verbesserungspotenziale bestehen und welche Gestaltungsmaßnahmen zu deren Verwertung eingeleitet werden können.

Neben der individuellen technischen Ausgangssituation wurden die Fallstudien auch mit unterschiedlichen *methodischen Voraussetzungen* durchgeführt. Dies bezieht sich beispielsweise auf die im Projekt verfügbaren Informationsquellen: Einige Entwicklungsteams konnten auf quantitative Daten aus umfangreichen Versuchen, Simulationsexperimenten und Berechnungen zugreifen (z. B. in Fallstudie III, V, VI, VIII), andere mussten Gestaltungsideen vorwiegend auf Basis von qualitativen Daten

aus Expertengesprächen und den verfügbaren Dokumentationen entwickeln (z. B. in Fallstudie I, II, IV, VII).

In allen acht Fallstudien lag der Forschungsfokus zunächst auf einer explorativen Ermittlung von methodischen Barrieren, die eine Analyse von Wirkzusammenhängen unter Anwendung des *Contact and Channel Ansatz*⁵⁵⁹ erschweren. Hierzu wurden die beteiligten Ingenieure zur Modellbildung mit diesem Ansatz angehalten⁵⁶⁰ und in wöchentlichen Besprechungen zum Vorgehen und zum Fortschritt bei den Konstruktionsarbeiten befragt. Die Erkenntnisse trugen u. a. zur Präzisierung der Forschungshypothesen und der Forschungsfragen bei.

Je nach Problemstellung wurden durch den Autor weitere Methodenempfehlungen in die Fallstudien eingebracht, um bestimmte Herausforderungen (siehe Kapitel 4.1.3) zu lösen, darunter *Design of Experiments*⁵⁶¹ (z. B. in Fallstudie III und V) und *Characteristics Properties Modelling*⁵⁶² (z. B. in Fallstudie VI). Das Vorgehen bei der kombinierten Anwendung der genannten Methoden und Modelle und die daraus resultierenden technischen Ergebnisse wurden in wöchentlichen Reviews mit den Konstrukteuren besprochen und ausgewertet.

Aus den Erkenntnissen der Erprobung dieser Methoden wurden in den Fallstudien I, III und VI⁵⁶³ neue Ideen für Modellierungstechniken erarbeitet, mit denen technische Wirkzusammenhänge quantifiziert und hinsichtlich ihres Potenzials zur Verbesserung funktionsbestimmender Eigenschaften analysiert werden können.⁵⁶⁴ In den jeweils nachfolgenden Fallstudien wurden diese Empfehlungen erprobt und iterativ weiterentwickelt.

Im folgenden Teilkapitel werden die technischen und die methodischen Herausforderungen erläutert, die im Verlauf der empirischen Fallstudien beobachtet wurden und die zur Entwicklung der in Kapitel 5 vorgestellten Vorgehenssystematik und Modellierungstechniken führten.

4.1.3 Beobachtungen zu technischen und methodischen Herausforderungen

Die *technischen* Herausforderungen in den Fallstudien bezogen sich auf das deduktive Ermitteln der funktionsbestimmenden Stellgrößen und – damit einhergehend – den Umgang mit Zielkonflikten bei der Verbesserung funktionsbestimmender Gestalteigenschaften. Zielkonflikte traten beispielsweise auf,

⁵⁵⁹ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Albers 2014a; siehe Kapitel 2.3.3

⁵⁶⁰ die erforderliche Methodenkompetenz war zum Teil bereits vorhanden; ergänzend wurde zu Beginn der Fallstudie ein ganztägiger Workshop zur Modellbildung mit C&C²-A durchgeführt.

⁵⁶¹ vgl. Kleppmann 2007; siehe Kapitel 2.5.3

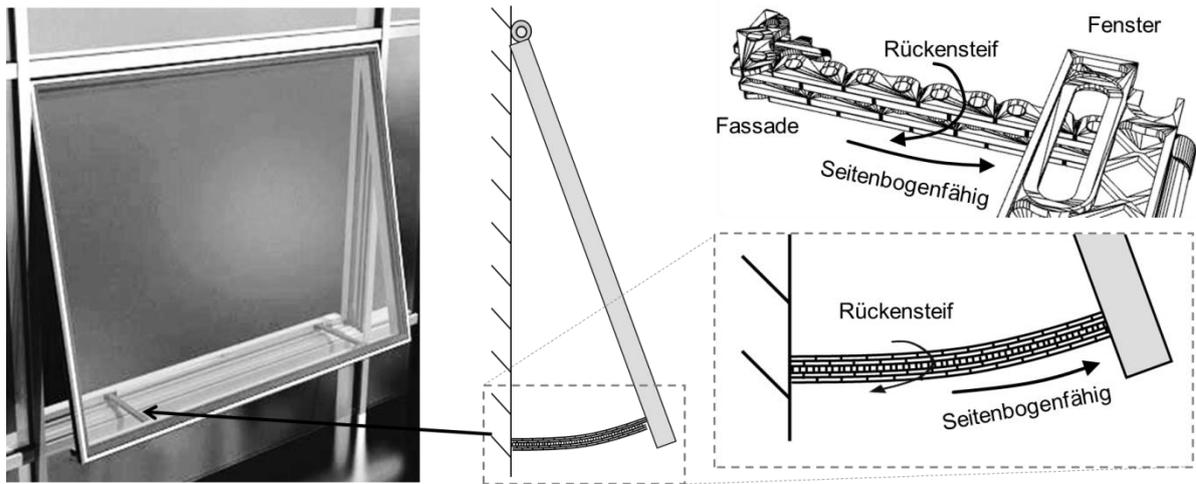
⁵⁶² vgl. Weber 2000, 2014; Köhler 2009; siehe Kapitel 2.4.2 und 2.4.3

⁵⁶³ vgl. Tian 2011, Stürtzel 2012, Kubel 2013 (betreute Abschlussarbeiten)

⁵⁶⁴ siehe Kapitel 5.3

wenn einzelne Gestalteigenschaften mehrere Funktionseigenschaften beeinflussen, sodass bei der Variation einer Gestalteigenschaft mehrere Funktionseigenschaften verändert werden.⁵⁶⁵ In Fallstudie I lag der Fokus der Entwicklungsarbeit beispielsweise auf der Rückensteifigkeit einer Antriebskette, deren Verbesserung jedoch nur durch Kompromisse bei der Seitenbogenfähigkeit möglich war. In Fallstudie II sollte ein möglichst leistungsfähiger Konsens aus mechanischer Tragfähigkeit und thermischem Isolationsvermögen einer Kälterohrschelle erreicht werden (siehe Abbildung 4.2).

Fallstudie I: Rückensteife Antriebskette / Schubkette



Fallstudie II: Kälterohrschelle

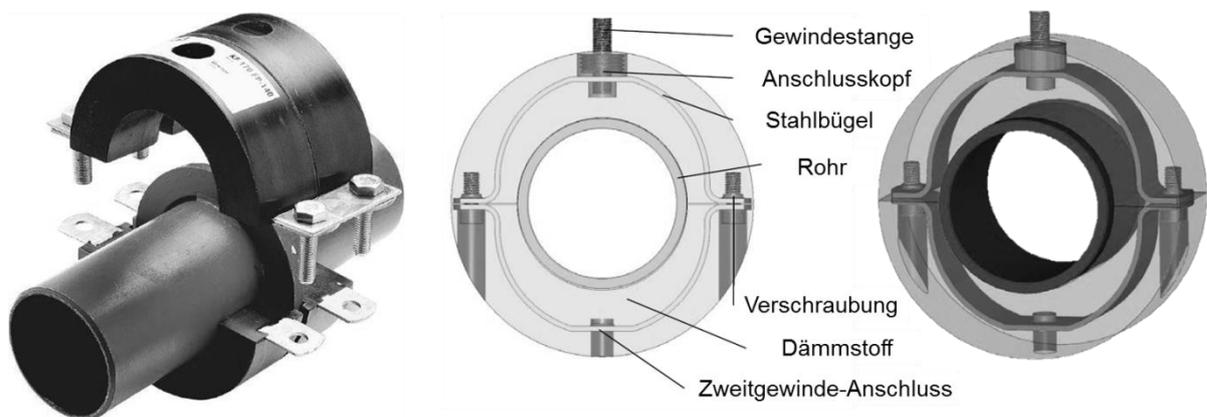


Abbildung 4.2: Referenzsysteme der Fallstudien I und II

Die *methodischen* Herausforderungen in den beobachteten Konstruktionsprojekten bezogen sich im Wesentlichen auf das Vorgehen zum Schließen der Definitions- und Wissenslücken zum Funktions-Gestalt-Zusammenhang:

⁵⁶⁵ vgl. Weber 2012

Kenntnisse über Wirkzusammenhänge: Die jeweiligen Referenzprodukte in den Fallstudien I, III, VI, VII und VIII wurden bereits seit mehreren Jahren von den Unternehmen erfolgreich entwickelt und vertrieben. Dennoch konnten die an den Fallstudien beteiligten Konstrukteure nicht auf ein ausreichend detailliertes Wissen über funktionsbestimmende Wirkzusammenhänge der Referenzprodukte zurückgreifen – sei es durch den Weggang der damaligen Konstrukteure, durch das Fehlen geeigneter Dokumentationen oder durch eine grundsätzliche Wissenslücke im Stand der Technik. Zu Beginn der Fallstudien war es den beteiligten Konstrukteuren daher nicht möglich, im Detail zu erklären, wie aus der Beschaffenheit der Wirk-Struktur des Referenzprodukts die beobachtete Qualität der Funktionserfüllung resultiert. Folglich war zunächst auch keine begründete Abschätzung möglich, welche Gestaltungsmaßnahmen zur Verbesserung der gewünschten Funktionen bzw. Funktionseigenschaften in Betracht zu ziehen wären.

Kenntnisse über relevante Anwendungsfälle: In Fallstudie I, II, III, IV, VI und VIII kam erschwerend hinzu, dass bei der Weiterentwicklung des jeweiligen Referenzprodukts viele unterschiedlicher Anwendungsfälle zu berücksichtigen waren.⁵⁶⁶ Dadurch konnten zu Beginn der Projekte nicht alle relevanten Einflussgrößen und Zielgrößen⁵⁶⁷ mit Sicherheit eingegrenzt werden. Die Konstruktionsarbeiten wurden daher zunächst bewusst auf einzelne ausgewählte Anwendungsszenarios fokussiert, um die Unbestimmtheit möglicher Anwendungsfälle einzuschränken und die damit verbundene Vielfalt potenzieller Einflussgrößen auf eine handhabbare Anzahl zu reduzieren.

Modellbildung zur Bestimmung von Wirkzusammenhängen: Um das Defizit an Wissen um funktionsrelevante Wirkzusammenhänge zu reduzieren, wurden in allen Fallstudien qualitative oder quantitative Daten anhand von Expertengesprächen, Literaturstudien, Versuchen oder Simulationsexperimenten erhoben. Die methodische Herausforderung für die Konstrukteure bestand in der Auswertung dieser zum Teil umfangreichen Datenbasis. Dabei wurde das Ziel verfolgt, Korrelationen zwischen Einfluss- und Zielgrößen zu ermitteln. Die gesammelten Daten wurden in Tabellen, Diagrammen, Formeln, etc. dargestellt, die mit den verfügbaren IT-Werkzeugen (Excel, Matlab etc.) umgesetzt werden konnten (siehe Abbildung 4.3). Bei der manuellen Auswertung dieser Daten fiel es den Konstrukteuren oft schwer, aus den unterschiedlichen Darstellungsformen konkrete Hypothesen über Wirkzusammenhänge zu ermitteln. Ausschlaggebend dafür waren einerseits unsicherheitsbehaftete Experteneinschätzungen und streuende

⁵⁶⁶ beispielsweise in Fallstudie III bzgl. der Werkstoffe und der Einspannung der Bleche sowie dem Montageverhalten der Anwender

⁵⁶⁷ die sich z. B. aus unterschiedlichen Anwenderprofilen oder zeitlichen Verläufen von Belastungskollektiven ergaben.

Messergebnisse aus Versuchen mit den Referenzprodukten. Besonders schwerwiegend äußerte sich die Komplexität der jeweiligen Konstruktionsprobleme jedoch in Form mehrdimensionaler Abhängigkeits- und Einflussbeziehungen zwischen geometrischen, stofflichen und prozesstechnischen Einflussgrößen und den funktionalen Zielgrößen der Projekte.⁵⁶⁸ Ergänzend zu dieser manuellen Datenauswertung konnte lediglich in den Fallstudien III und V eine statistische Korrelationsanalyse durchgeführt werden, da in den anderen Entwicklungsteams keine entsprechenden Methodenkompetenzen für statistische Datenanalyseverfahren verfügbar waren.

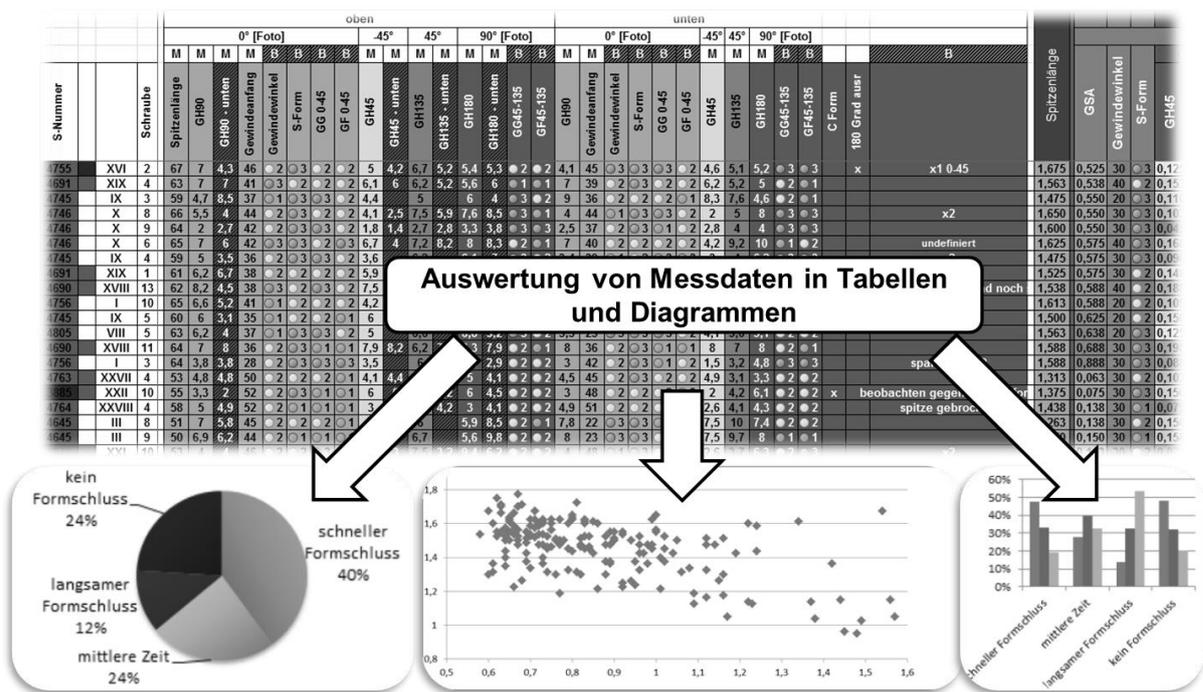


Abbildung 4.3: Komplizierte Auswertung von Messdaten mit Tabellen und Diagrammen (symbolische Darstellung aus Fallstudie III)

Ausweichen auf eine assoziative Lösungssuche: Die Komplexität der jeweiligen Konstruktionsprobleme führte bei der Entwicklung von Gestaltungsvorschlägen dazu, dass in den Fallstudien I, II, IV und VII zunächst vorwiegend intuitiv-assoziative Gestaltungsideen eingebracht wurden. Sie basierten nicht auf gesicherten Erkenntnissen, sondern auf Vermutungen und spontanen Einfällen. In Versuchen und Simulationsexperimenten sollte anschließend überprüft werden, inwiefern diese assoziativen Lösungsvorschläge zur Zielerreichung geeignet sind. Eine begründete Aussage, inwiefern Verbesserungspotenziale an den Wirkprinzipien der Referenzprodukte bestehen und inwieweit diese mit den Gestaltungsideen ausgeschöpft würden, war mit diesem opportunistischen Vorgehen nicht möglich.

⁵⁶⁸ siehe Kapitel 5.3, insbesondere Abbildung 5.9, Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16

Ebenfalls fiel es den beobachteten Konstrukteuren aufgrund mangelnder Kenntnisse über die realen Wirkzusammenhänge schwer zu beurteilen, inwiefern sich aus ihren Gestaltungsideen unbeabsichtigte Auswirkungen für andere wichtige, aber nicht als Zielgröße definierte Funktionseigenschaften ergeben könnten.

Trotz der individuellen Charaktere der Fallstudien und der Entwicklungsprojekte konnten prinzipiell ähnliche methodische Herausforderungen beobachtet und in den oben genannten Kategorien zusammengefasst werden. In reflektierenden Gesprächen mit den beteiligten Entwicklungsingenieuren wurden verschiedene Barrieren als Ursachen für diese Herausforderungen erkannt. Sie werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

4.2 Methodische Barrieren einer induktiv-deduktiven Vorgehenssystematik

Im Verlauf der acht Fallstudien entstand durch Beobachtungen und in Gesprächen mit den beteiligten Konstrukteuren eine Modellvorstellung von drei Barrieren, die den begleiteten Konstrukteuren eine rein deduktive Funktionsanalyse und Synthese von Gestaltungsideen erschwerten (siehe Abbildung 4.4).⁵⁶⁹ Diese Barrieren bewirkten jeweils ein Ausweichen auf intuitiv-assoziative Vorgehensweisen, sofern vom Autor der vorliegenden Arbeit keine Methodenunterstützung zur Überwindung der Barrieren eingebracht wurde. Die einzelnen Hintergründe und Beobachtungen zu diesen Barrieren werden in den folgenden Teilkapiteln erläutert.

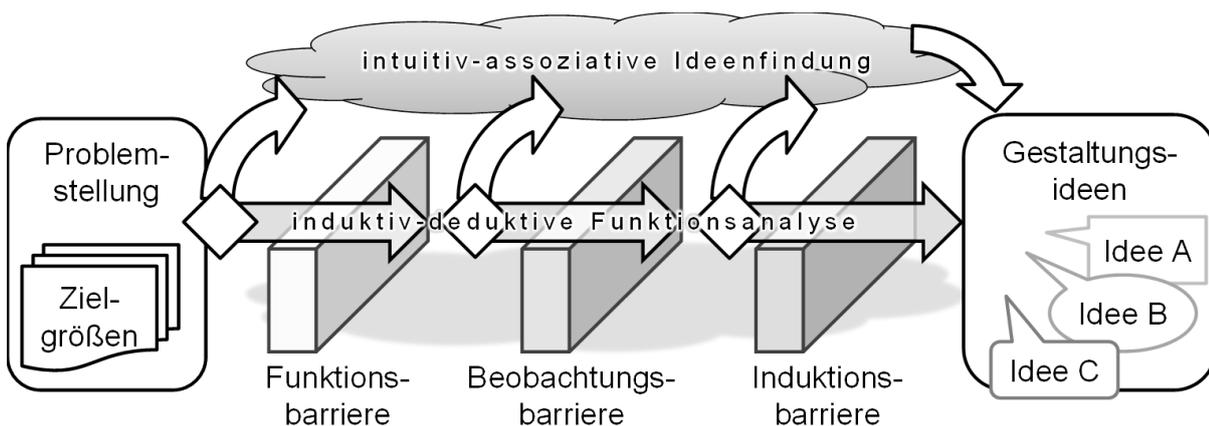


Abbildung 4.4: Methodische Barrieren in den begleiteten Entwicklungsprojekten

⁵⁶⁹ Der Autor brachte methodische Empfehlungen in die Entwicklungsprojekte ein, um den in Kapitel 4.1.3 beschriebenen, methodischen Herausforderungen zu begegnen. Aus den dabei gemachten Beobachtung leitet sich die Modellvorstellung der genannten Barrieren ab.

4.2.1 Die Funktionsbarriere

Die Funktionsbarriere bezeichnet eine von Konstrukteuren subjektiv empfundene Unsicherheit im expliziten Umgang mit Funktionsbeschreibungen. Sie wurde jeweils zu Beginn der begleiteten Entwicklungsprojekte beobachtet, wenn

- die konstruktive Problemstellung nur vage spezifiziert war und
- sich die die Konstruktionsteams daher zunächst ein konkreteres Verständnis für die an der Funktionserfüllung beteiligten Elemente der Referenzsysteme⁵⁷⁰ erarbeiten wollten.

Im Detail befasste sich bereits ALINK mit dem genannten Phänomen, daher sei für eine vertiefte Abhandlung der Ursachen auf dessen Arbeit verwiesen.⁵⁷¹ Sie ist speziell auf die Entwicklung eines Funktionsverständnisses für die *assoziative* Lösungssuche fokussiert.⁵⁷² In der vorliegenden Arbeit wird eine Funktionsanalyse hingegen als Vorbereitung für eine *deduktive* Gestaltsynthese behandelt. Die nachfolgend erläuterten Beobachtungen werden daher vor dem Hintergrund einer induktiv-deduktiven Vorgehenssystematik reflektiert.

In fünf von acht Fallstudien⁵⁷³ äußerten die beteiligten Konstrukteure explizit den Bedarf, die vorgegebenen Zielgrößen zu konkretisieren, sowie die Funktionen und Funktionseigenschaften der Referenzprodukte besser zu verstehen. In Fallstudie VI sollte beispielsweise zunächst ermittelt werden, aus welchen Funktionen und Funktionseigenschaften sich die Zielgröße „Sicht aus einer Automobil-Windschutzscheibe auf die Straße“ zusammensetzt. Ähnlich abstrakte Vorgaben waren in den Zielsystemen der anderen sieben Fallstudien formuliert. Sie sind in Tabelle 4-3 zur Übersicht qualitativ dargestellt.

⁵⁷⁰ ein Referenzsystem setzt sich aus dem Referenzprodukt des jeweiligen Entwicklungsprojekts sowie den in der Funktionserfüllung involvierten Umgebungssystemen zusammen. Als „Elemente der Referenzsysteme“ werden je nach Betrachtungstiefe einzelne Baugruppen und Komponenten, oder auch die Eigenschaften deren Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen bezeichnet.

⁵⁷¹ vgl. Alink 2010

⁵⁷² vgl. Alink 2010 S.175, S.187: „Die Synthese findet statt, indem die Gestalt hinterfragt und abstrahiert wird, d. h. die Gestaltinformation wird weggenommen, um je nach Ziel des Projektes nach Lösungen zu suchen“. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird bewusst auf eine Abstraktion der Produktgestalt verzichtet. Vielmehr werden die konkreten Gestalt- und Prozessparameter ermittelt, die einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung haben.

⁵⁷³ vgl. Tian 2011, Leiser 2011, Stürtzel 2012, Stemmler 2013, Wall 2014 (betreute Abschlussarbeiten)

Tabelle 4-3: Funktionale Zielgrößen in den begleiteten Entwicklungsprojekten

Fallstudie	I	II	III	IV
Referenzprodukt	Antriebskette	Kälterohrschelle	Blechbohrschraube	Werkzeug zur Blechbearbeitung
funktionale Zielgrößen	Rückensteifigkeit, Seitenbogenfähigkeit Lastaufnahme	Isolationsvermögen Lastaufnahme Diffusionsdichtigkeit Handling (Montage)	Einschraubzeit Ausfallrate Kraftbedarf	Hubleistung Handling Sicherheit
Fallstudie	V	VI	VII	VIII
Referenzprodukt	Druckbegrenzungsventil	Automobil Cockpit	Schließsystem für Motorhauben	Säbelsäge
funktionale Zielgrößen	Hydraulische Dichtheit	Sicht durch die Windschutzscheibe auf die Straße	Bedienkomfort Bediensicherheit	Sägefortschritt pro Zeit

Beim Konkretisieren der genannten Zielgrößen zeigten sich die befragten Entwickler unsicher in der Wahl einer geeigneten Beschreibungsform zur expliziten Darstellung ihres mentalen Funktionsverständnisses. Diese Unsicherheit wurde in allen begleiteten Entwicklungsprojekten beobachtet. Sie wird auf zwei grundlegende Ursachen zurückgeführt:

- *Mehrdeutigkeit:* Bei der Zuordnung von Funktionen und Funktionseigenschaften gingen die Konstrukteure vielfach von der Auffassung „Bauteile sind Funktionsträger“ aus.⁵⁷⁴ Dennoch fiel es ihnen schwer, eine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Elementen der Referenzprodukte zu treffen.⁵⁷⁵ Begründet wird dies mit dem Phänomen der Emergenz: Funktionen und Funktionseigenschaften entstehen erst aus dem Zusammenspiel der Systemelemente, können jedoch nicht einzelnen Elementen isoliert zugeordnet werden: „*Ein Bauteil für sich betrachtet erfüllt keine Funktion.*“⁵⁷⁶ Eine Funktion erfordert Interaktionen mehrerer Systemelemente und die Qualität der Funktionserfüllung wird bestimmt von den äußeren Einflussgrößen und der Beschaffenheit der beteiligten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen.⁵⁷⁷

⁵⁷⁴ dieses Verständnis wird vielfach auch in der Konstruktionswissenschaft vertreten, vgl. Kapitel 2.3.1

⁵⁷⁵ Dieses Phänomen wurde bereits mehrfach in konstruktionswissenschaftlichen Arbeiten beobachtet (vgl. Thau 2013 S.6). Es begründet maßgeblich die Forschungsarbeiten zum *Contact and Channel Approach* (vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Albers 2014a).

⁵⁷⁶ Albers 2011a S.204

⁵⁷⁷ vgl. Hypothese II nach Albers 2002 und Matthiesen 2002 S.54

- *Wissenslücken:* Bei der Modellbildung wurde deutlich, dass die einzelnen Vorgänge und Zustände der Funktionserfüllung meist nicht im Detail verstanden waren. ALINK stellt fest, dass solche „Defizite erst erkannt werden, wenn dies von außen stimuliert wird. Der Zeitpunkt, zu dem ein Ingenieur von sich behauptet, dass die Funktionsweise des Systems verstanden ist oder die Tiefe, mit welcher er meint, das System zu verstehen, ist subjektiv.“⁵⁷⁸

In den begleiteten Entwicklungsprojekten führte ein derart subjektiv ausreichendes Systemverständnis der Konstrukteure in Kombination mit den genannten Problemen bei der expliziten Modellbildung zu der Tendenz, die Funktionsbarriere mit assoziativen Gestaltungsideen zu umgehen. Dazu wurden die bestehenden Wirkprinzipien mithilfe von Kreativitätstechniken abgewandelt und durch spontan interessant erscheinende Alternativen ersetzt.⁵⁷⁹ Eine sachlogische Vorgehensweise zur Verbesserung des bestehenden Lösungsprinzips war aus Sicht der Entwickler nicht möglich.

Der Autor der vorliegenden Arbeit sieht den Grund dafür in der sogenannten Funktionsbarriere. Sie wurde vom Autor durch Auswertung der Fallstudien als Modellvorstellung entwickelt, aber von den begleiteten Entwicklungsingenieuren während der Projektarbeit selbst nicht explizit wahrgenommen. Die Entwickler hinterfragten ihr Funktionsverständnis nur selten systematisch, sofern nicht eine bestimmte Methode dazu angeboten wurde, z. B. der Contact and Channel Approach (C&C²-A). Für die ersten Lösungsvorschläge in den Projekten, die durch ein intuitiv-assoziatives Vorgehen entstanden waren, lagen daher auch keine sachlogischen Begründungen mit Bezug auf die funktionsbestimmenden Wirkzusammenhänge vor.

4.2.2 Die Beobachtungsbarriere

Die Beobachtungsbarriere bezeichnet eine eingeschränkte Zugänglichkeit der Orte der Funktionserfüllung für eine Beobachtung oder Prognose von Wirkzusammenhängen in technischen Systemen. Sie hatte immer dann einen Einfluss auf den Verlauf der begleiteten Entwicklungsprojekte, wenn eine intuitive Bestimmung der funktionsrelevanten Vorgänge an den Wirkorten und deren Eigenschaften nicht möglich war. Dies war insbesondere dann der Fall, wenn nicht nur geometrische,⁵⁸⁰ sondern auch stoffliche, z. B. thermische oder strömungsmechanische Wechselwirkungen untersucht werden sollten:

- Spannungszustände in den Gliedern einer druckbelasteten Antriebskette (I),⁵⁸¹

⁵⁷⁸ Alink 2010 S.61

⁵⁷⁹ vgl. Leiser 2012 S. 43; Herzog 2012 S.66 (betreute Abschlussarbeiten)

⁵⁸⁰ wie in Fallstudie VI, vgl. Kubel 2013 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁸¹ vgl. Tian 2011 (betreute Abschlussarbeit)

- Spannungen und Wärmeausdehnungen in einer Kälterohrschelle (II),⁵⁸²
- Zerspanungs- und Verdrängungsmechanismen bei Schrauben (III)⁵⁸³ und Pendelhub-Sägen (VIII),⁵⁸⁴
- Leckageströmungen in hydraulischen Druckbegrenzungsventilen (V),⁵⁸⁵
- Reibungseffekte und Elastizitäten von Bowdenzügen (VII).⁵⁸⁶

In diesen Situationen helfen Versuche (für Beobachtungen) und Simulationen (für Prognosen) dabei, die Funktionsweise und die funktionsrelevanten Gestalt- und Prozessparameter besser zu verstehen.

Je nach Ausgangssituation trat die Beobachtungsbarriere in den begleiteten Entwicklungsprojekten in zwei Ausprägungen (und diversen Mischformen) auf:

- In den Fallstudien III, V, VI und VIII war eine Erhebung quantitativer Daten grundsätzlich möglich, jedoch war dazu der Einsatz spezieller Messmethoden und Simulationsverfahren erforderlich, um Wechselwirkungen direkt zu beobachten⁵⁸⁷ oder zu quantifizieren. Dies war mit einem entsprechenden Zeit- und Kostenaufwand verbunden.
- In den Fallstudien I, II, IV und VII waren Versuche und Simulationen nicht oder nur stark eingeschränkt durchführbar. Die Beobachtungsbarriere bezog sich dadurch nicht auf die eingeschränkte Mess- oder Beobachtbarkeit einer speziellen Funktion oder Wechselwirkung, sondern grundsätzlich darauf, dass eine umfangreiche Erhebung quantitativer Daten nicht möglich war. Die Entwicklungsingenieure mussten stattdessen mit qualitativen Informationen (aus Literaturrecherchen und Erfahrungswissen) arbeiten, um die Zusammenhänge von Funktion und Gestalt zu erklären.

Nach ALBERS entwickeln Konstrukteure in der Entwicklungspraxis, wenn eine Beobachtungsbarriere besonders ausgeprägt ist, bevorzugt mentale Modelle, die nur eingeschränkt überprüfbar und daher anfällig für Fehler beim Konstruieren sind. Abhilfe könnte an dieser Stelle die Kopplung physisch-virtueller Validierungstechniken wie die des X-in-the-Loop⁵⁸⁸ leisten, sofern die dazu erforderlichen Einrichtungen in Entwicklungsprojekten verfügbar sind.

Für solche Anwendungsfälle, in denen Versuche und Simulationsexperimente durchgeführt werden können, beschreibt THAU Heuristiken zur Beobachtung bzw. zur Prognose von Funktionsabläufen und zur Bestimmung funktionsrelevanter

⁵⁸² vgl. Leiser 2011 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁸³ vgl. Thau 2006 S.25, Stürtzel 2012 S.86 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁸⁴ vgl. Wall 2014 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁸⁵ vgl. Stemmler 2013 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁸⁶ vgl. Gaede 2013 (betreute Abschlussarbeit)

⁵⁸⁷ z. B. Slow-Motion Kameraaufnahmen, eingebaute Sensoren etc.

⁵⁸⁸ vgl. Albers 2008b

Wirkflächen(paare) und Leitstützstrukturen.⁵⁸⁹ Sie geben Hinweise, wie durch ein gezieltes Nachstellen von Funktionsabläufen oder durch Manipulation der Produktgestalt Hypothesen über funktionsrelevante Wirkzusammenhänge gebildet und überprüft werden können.

In Kapitel 5 dieser Arbeit werden ergänzend dazu mehrere Modellierungstechniken vorgestellt, mit denen die Informationen aus Versuchen, Simulationsexperimenten und Recherchen ausgewertet werden können. Dabei werden auch jene Anwendungsfälle berücksichtigt, in denen lediglich Literaturrecherchen und Erfahrungswissen als Informationsquellen genutzt werden können.

4.2.3 Die Induktionsbarriere

Die Induktionsbarriere bezieht sich auf die mentale Herausforderung, Modelle und Hypothesen über Wirkzusammenhänge aus Beobachtungen der Funktionen und der Gestalt eines Referenzprodukts zu bilden (induktive Modellbildung). Die Ursache dafür liegt in der oft hohen Komplexität technischer Wirkzusammenhänge. Diese Komplexität ergibt sich aus einer Vielzahl von Abhängigkeits- und Einflussbeziehungen zwischen den Gestalt- bzw. Prozessparametern und der Funktionserfüllung technischer Produkte.

Exemplarisch kann diese Komplexität anhand des in Abbildung 4.5 dargestellten Modells einer rückensteifen Antriebskette erklärt werden. In Fallstudie I ermittelten die beteiligten Konstrukteure mindestens 16 Wirkflächenpaare, die einen Einfluss auf die drei untersuchten Funktionseigenschaften haben. Hinzu kommen noch die Leitstützstrukturen der Bolzen und Laschen, die mit ihren Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften ebenfalls die Funktionserfüllung beeinflussen. Bereits an diesem sehr einfachen Beispiel wird die Komplexität der Zusammenhänge von Funktion und Gestalt deutlich. Bei technischen Systemen mit einer größeren Anzahl an Komponenten und Wechselwirkungen kann von einer Multiplikation der funktionsrelevanten Einflussbeziehungen ausgegangen werden.

⁵⁸⁹ Thau 2013 S.103ff.; obwohl sie den Namen „Heuristiken zur Modellbildung“ tragen, beschreiben sie weniger die Bildung von Modellen mithilfe von Modellierungstechniken, sondern vielmehr das Vorgehen zur Beobachtung der Funktionserfüllung in Versuchen und Simulationen.

In der statistischen und konstruktionsmethodischen Fachliteratur wird in solchen Fällen von „multivariaten Abhängigkeitsstrukturen“ und „Mehrzieloptimierungsproblemen“ gesprochen. Als Hilfsmittel zur Bestimmung von Wirkzusammenhängen und zur Entwicklung von Optimierungsvorschlägen werden numerischen Schätzverfahren⁵⁹⁰ und Parameteroptimierungs-Werkzeuge⁵⁹¹ empfohlen.⁵⁹² Diese setzen jedoch nicht nur eine speziell vertiefte Methodenkompetenz voraus, sondern auch die Verwendung parametrischer Modelle der Referenzprodukte oder die

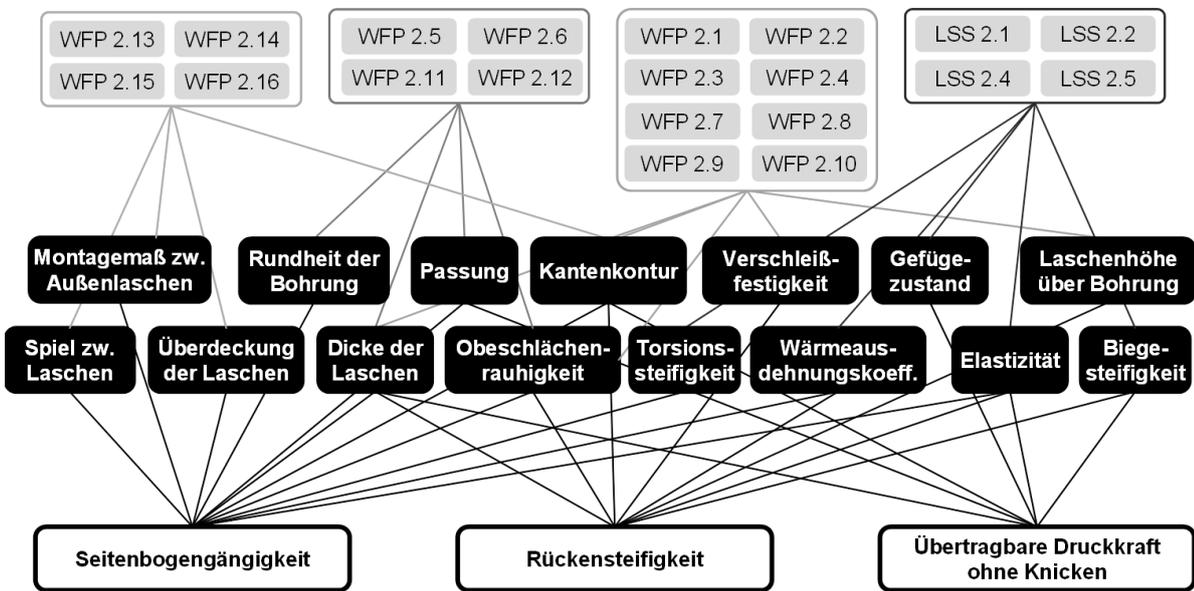
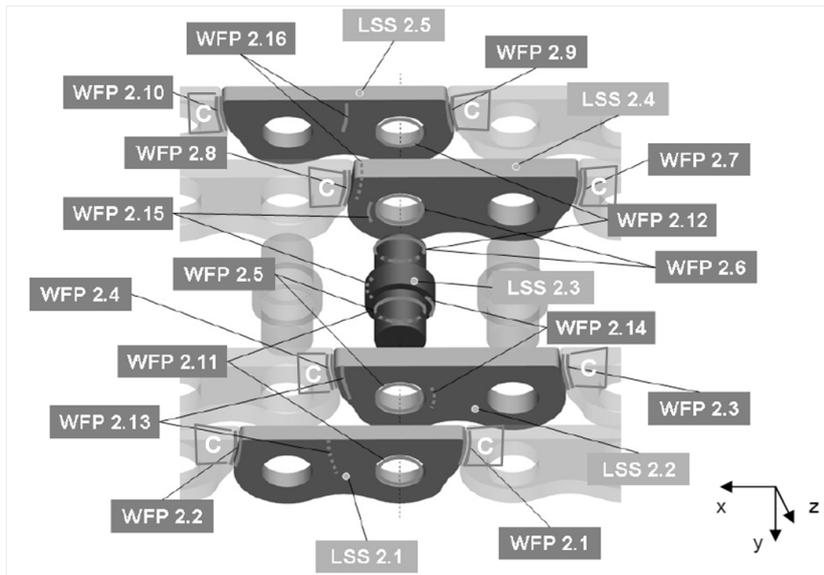


Abbildung 4.5: Verknüpfung der Gestalteigenschaften von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen mit Funktionseigenschaften einer rückensteifen Antriebskette (Fallstudie I)

⁵⁹⁰ vgl. Backhaus 2011 S.87f.

⁵⁹¹ vgl. Prüfer 1982, DAKOTA 2013

⁵⁹² Als Alternative besteht die Möglichkeit zur Anwendung von Kreativitätstechniken. In dieser Arbeit wird jedoch der Fokus auf eine rational-deduktive Entwicklung von Gestaltungsvorschlägen gelegt.

Durchführung umfangreicher Versuche mit einer Stichprobenzahl, die etwa „dem Fünffachen der Anzahl der zu schätzenden Parameter entspricht.“⁵⁹³

In den begleiteten Entwicklungsprojekten erfolgte die Verknüpfung von Funktion und Gestalt hingegen vorwiegend durch sachlogische Denkprozesse, die durch individuelle Notizen und Skizzen unterstützt wurden. Die subjektiv empfundene Komplexität der Problemstellung wurde von den beteiligten Konstrukteuren daher als besonders hoch eingeschätzt. VOLLMER begründet diese Einschätzung damit, dass die menschliche Fähigkeit zu abstraktem und logischem Denken begrenzt ist: „Mit unseren kognitiven Fähigkeiten sind wir nicht nur auf mittlere physikalische Dimensionen geprägt, sondern auch auf Systeme geringer Komplexität, auf kurze, unverzweigte Kausalketten, auf lineare Extrapolation, auf die Suche nach Regelmäßigkeiten, auf Eindeutigkeit und Gewissheit.“⁵⁹⁴

Auf Anregung des Autors wurden in den Fallstudien verschiedene methodische Hilfsmittel angewendet, um die Induktionsbarriere zu überwinden. Sie sind in den Kapiteln 5.2 und 5.3 ausführlich beschrieben. An dieser Stelle sei jedoch bereits vorweggenommen, dass in den Fallstudien eine Kombination mehrerer Modellierungstechniken erforderlich war, um Wirkzusammenhänge qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Der Grund dafür liegt in der Begrenzung der jeweiligen Anwendungsbereiche der Modelle. Nachfolgend wird dazu ein Beispiel erläutert:

Durch die explizite Modellbildung mit dem Contact and Channel Approach (C&C²-A) konnte die subjektiv empfundene Komplexität der Wirkzusammenhänge in einem ersten Schritt auf ein kognitiv leichter verständliches Niveau verringert werden. Die Entwickler wurden dadurch in die Lage versetzt, die Funktionsweise der Referenzsysteme durch Benennung der Funktionen und Kennzeichnung der zugehörigen Wirk-Struktur qualitativ zu beschreiben. Davon ausgehend waren sie in der Lage, qualitative Hypothesen über Wirkzusammenhänge auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zu bilden, wie z. B.:⁵⁹⁵

- „WFP2.9 ist an der Erfüllung der Teilfunktionen 1.5 und 2.2 beteiligt.“
- „Die Ausrichtung und die Größe der Auflageflächen von WFP2.9 haben einen Einfluss auf die Funktionseigenschaft *Rückensteifigkeit* der Antriebskette.“
- „Die Elastizität der LSS2.5 führt unter Last zu einem Verkanten der WFP2.12 und WFP2.6 und dadurch zu einer Beeinträchtigung der Funktionseigenschaft *Seitenbogenfähigkeit*.“

⁵⁹³ Backhaus 2011 S.110; Buch 2007 S.30

⁵⁹⁴ Ehrlenspiel 2009 S. 72 nach Vollmer 2002

⁵⁹⁵ Das korrespondierende Contact and Channel Modell ist in Abbildung 6.2 in Kapitel 6.1.1 abgebildet

Zur Überprüfung solcher Hypothesen wurden in den Fallstudien III, IV, V und VI empirische Versuche und Simulationsexperimente durchgeführt.⁵⁹⁶ Die dabei gemessenen und prognostizierten Daten konnten jedoch nicht unmittelbar in die bestehenden (qualitativen) Modelle integriert werden. Dadurch musste entweder ein Methodenwechsel (zu statistischen Analyseverfahren⁵⁹⁷) oder eine selbst entwickelte Erweiterung der Modelle vorgenommen werden (siehe Kapitel 5.3).

Nach ALINK besteht in den begrenzten Anwendungsbereichen einzelner Modellierungstechniken eine grundlegende Problematik der Entwicklungsmethodik: *„Da das Lösen von Gestaltungsproblemen aber oftmals einen Wechsel der Modelle [...] erfordert, besteht hierin eine wesentliche Anwendungsbarriere: Die Entwickler müssen die Kombination von Modellen für ihr spezifisches Gestaltungsproblem selbst erstellen. Dieser nicht unerhebliche Teil der Anstrengung führt zur mehr oder weniger starken Ablehnung der vorgeschlagenen Methoden in der industriellen Praxis.“*⁵⁹⁸

Die Komplexität und Intransparenz der Wirkzusammenhänge, verbunden mit einer nicht durchgängig (d. h. qualitativ und quantitativ) unterstützten Modellbildung, wurde in den Fallstudien als mentale Barriere bei der Anwendung von Konstruktionsmethoden wahrgenommen. Ein opportunistisches Vorgehen und die Suche nach assoziativen Gestaltungsideen wurden von den Konstrukteuren erneut als ökonomisch sinnvoller⁵⁹⁹ eingestuft (siehe Abbildung 4.4) als die Fortsetzung eines induktiv-deduktiven Vorgehens, für das keine durchgängige Methodenunterstützung verfügbar war.

4.2.4 Zwischenfazit

In den begleiteten Entwicklungsprojekten wurden mit der Funktionsbarriere, der Induktionsbarriere und der Beobachtungsbarriere drei methodische Herausforderungen beobachtet, die beim Konstruieren eine induktiv-deduktive Funktionsanalyse und Synthese von Gestaltungsideen erschweren. Die vorliegende Arbeit fokussiert in den nachfolgenden Kapiteln auf die Induktionsbarriere, da mit den Arbeiten von ALINK und THAU bereits wissenschaftliche Untersuchungen und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen für die Funktions- und die Beobachtungsbarriere vorliegen.⁶⁰⁰

⁵⁹⁶ vgl. Stürtzel 2012, Herzog 2012, Stemmler 2013, Gaede 2013 (betreute Abschlussarbeiten)

⁵⁹⁷ vgl. Kapitel 2.5.3

⁵⁹⁸ Alink 2010 S.33

⁵⁹⁹ vgl. Dörner 1987, Hacker 1996

⁶⁰⁰ vgl. Alink 2010, Thau 2013

Ein charakteristisches Kennzeichen der Induktionsbarriere ist die subjektiv empfundene Komplexität eines Gestaltungsproblems. Sie wird einerseits hervorgerufen durch die Komplexität multivariater Wirkzusammenhänge und andererseits verstärkt durch die Beschränkung der etablierten konstruktionsmethodischen Modellierungstechniken auf eine qualitative Funktionsanalyse (siehe Abbildung 4.7 in Kapitel 4.3.2).

In den nachfolgenden Kapiteln wird eine Vorgehenssystematik entwickelt, die als Leitfaden bei der Überwindung der Induktionsbarriere dienen soll. Der Fokus liegt dabei – entsprechend den oben genannten Charakteristika – auf

- der Formulierung und Verknüpfung konkreter *Schwerpunkt-Aktivitäten*, um die Komplexität eines Gesamtproblems zu zerlegen und die einzelnen Teilprobleme für eine methodische Unterstützung zugänglich zu machen;
- der Entwicklung von Empfehlungen für korrespondierende *Methoden und Modellierungstechniken*, mit denen die Abhängigkeits- und Einflussbeziehungen multivariater Wirkzusammenhänge qualitativ und quantitativ dargestellt und dadurch für eine Auswertung zugänglich gemacht werden können.

4.3 Reflexion der Erkenntnisse aus Theorie und Praxis

In diesem Teilkapitel werden die Erkenntnisse aus den empirischen Fallstudien und der begleitend durchgeführten Literaturstudie zusammengeführt. Dies ermöglicht einerseits eine Fokussierung der erkenntnistheoretischen und operativen Anforderungen an die Forschungsarbeit. Andererseits wird auf dieser Grundlage eine erste Vorauswahl von Aktivitäten, Methoden und Modellen zum induktiv-deduktiven Lösen von Gestaltungsproblemen getroffen.

4.3.1 Erkenntnisse aus den empirischen Fallstudien

In den Fallstudien wurde beobachtet, dass die Fähigkeit von Konstrukteuren zur deduktiven Funktionsanalyse und Synthese von Gestaltungsideen besonders von den Möglichkeiten zur expliziten Modellbildung bestimmt werden.⁶⁰¹ So war es den beobachteten Konstrukteuren möglich, assoziative Gestaltungsideen bereits auf Grundlage von einem qualitativen Systemverständnis und mit qualitativen Hypothesen⁶⁰² über funktionsbestimmende Wirkzusammenhänge zu entwickeln. Für eine deduktive Lösungsentwicklung war jedoch zusätzlich eine empirische Datenerhebung, z. B. durch Versuche und Simulationsexperimente, und eine

⁶⁰¹ siehe Kapitel 4.2; vgl. Alink 2010 S.61

⁶⁰² die z. B. mit dem Contact and Channel-Approach gebildet wurden

anschließende Auswertung der erhobenen Daten erforderlich, um ein quantitatives Systemverständnis entwickeln zu können.⁶⁰³

Aus dieser Erkenntnis wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, das in groben Zügen die Abfolge der Entwicklungsaktivitäten in den Konstruktionsprojekten beschreibt (siehe Abbildung 4.6): Ausgehend von empirischen Beobachtungen und dem verfügbaren Erfahrungswissen der Entwicklungsingenieure wurden in den Fallstudien zunächst qualitative Modelle und Hypothesen über Wirkzusammenhänge gebildet (Induktion). Charakteristisch war dabei ein zirkuläres Vorgehen mit häufigen Wechseln zwischen Empirie und Theorie, bis ein ausreichendes Wissen und ein Konsens über die relevanten Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge ermittelt wurden.

Aus diesem qualitativen Systemverständnis konnten bereits erste Gestaltungsideen entwickelt und diskutiert werden (Assoziation). Für ein deduktives Vorgehen war jedoch eine vertiefte Analyse der funktionsbestimmenden Wirkzusammenhänge erforderlich. Dazu wurden Testfälle für die vorliegenden Hypothesen definiert und die erforderlichen Untersuchungen methodisch vorbereitet (z. B. mittels DoE). Mit den in Versuchen, Simulationsexperimenten und Expertengesprächen erhobenen Daten konnten anschließend die vorhandenen Modelle und Hypothesen überprüft, korrigiert und weiter detailliert werden. Das dabei entwickelte, quantitative Systemverständnis ermöglichte eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen, die in nachfolgenden empirischen Untersuchungen verifiziert und validiert wurden.

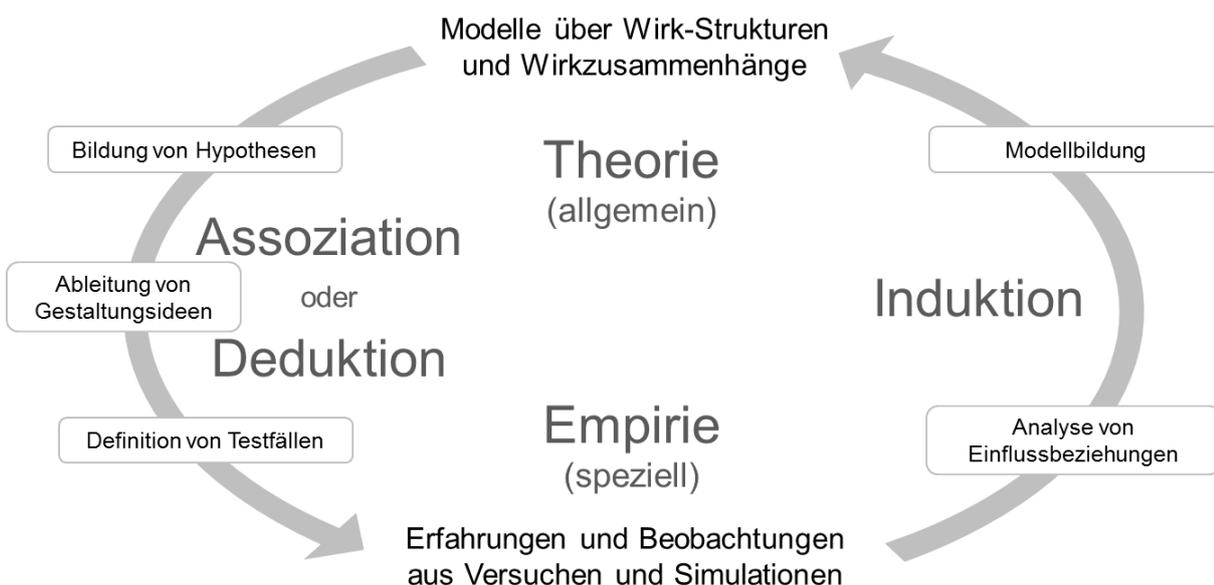


Abbildung 4.6: Iteratives Vorgehen beim induktiv-deduktiven Lösen von Gestaltungsproblemen

⁶⁰³ vgl. Thau 2013 S.133ff.

Dieses iterative Vorgehen von Empirie und Theorie bzw. von Induktion, Assoziation und Deduktion wurde meist mehrfach in kurzen Zyklen durchlaufen. Die dabei ausgeführten Aktivitäten der Produktentwicklung⁶⁰⁴ konnten – abhängig vom Systemverständnis und des Reifegrads der Modellbildung – vorwiegend der *Ideenfindung*, dem *Modellieren von Prinzip und Gestalt* sowie dem *Verifizieren und Validieren* von Hypothesen und Gestaltungsideen zugeordnet werden.

Die in Kapitel 4.2 beschriebenen Barrieren betreffen die induktive Modellbildung in allen drei wesentlichen Bereichen: Empirie (Beobachtungsbarriere), Induktion (Induktionsbarriere) und Theorie (Funktionsbarriere). Je nach Ausprägung können diese Barrieren dazu führen, dass die Modellbildung nur unvollständig explizit und zu großen Teilen mental durchgeführt wird, d. h. es werden nur mentale Modelle gebildet, aber keine Dokumentationen angefertigt. Eine solche Unterbrechung der expliziten Modellbildung führte in den Fallstudien häufig zu einem Wechsel von einem systematischen zu einem opportunistischen Vorgehen oder zu einem Ausweichen auf eine assoziative Suche nach neuen Gestaltungsideen.⁶⁰⁵ Charakteristisch für eine solche Situation war

- das Erreichen einer natürlichen Grenze des Anwendungsbereichs⁶⁰⁶ einer Methode bzw. einer Modellbildung, sowie
- eine damit verbundene Unterbrechung der Methodenunterstützung bei der Überwindung der Funktions- oder Induktionsbarriere,

sodass für ein fortgesetzt systematisches Vorgehen ein Methoden- bzw. Modellwechsel hätte stattfinden müssen. Diese Beobachtung bestätigt die von ALINK formulierte Hypothese, wonach ein „*Wechsel der Modelle [...] eine wesentliche Anwendungsbarriere*“⁶⁰⁷ für ein durchgehend systematisches Vorgehen darstellt.

Eine durchgängig explizite, qualitative und quantitative Modellbildung hatte in den empirischen Fallstudien eine herausragende Bedeutung für eine deduktive Vorgehenssystematik. Durch qualitative Modellbildung wird zunächst eine Übersicht über die relevanten Einflussgrößen gebildet. Das grundlegende Systemverständnis wird geschärft und der Untersuchungsbereich kann bewusst ausgewählt bzw. eingeschränkt werden. Durch ein anschließendes Quantifizieren der Einflussbeziehungen können Konstruktionsparameter⁶⁰⁸ hinsichtlich ihres Einflusses auf die Funktionserfüllung bewertet und Gestaltungsideen zur Verbesserung von Funktionseigenschaften abgeleitet werden.

⁶⁰⁴ vgl. Albers 2011b

⁶⁰⁵ vgl. Leiser 2012 S. 43; Herzog 2012 S.66 (betreute Abschlussarbeiten)

⁶⁰⁶ vgl. Tabelle 4-4 in Kapitel 4.3.2

⁶⁰⁷ Alink 2010 S.33

⁶⁰⁸ Die funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter eines technischen Produkts werden im Folgenden auch unter der Bezeichnung „Konstruktionsparameter“ zusammengefasst

4.3.2 Bewertung der in der Literatur beschriebenen Methoden

Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus den empirischen Fallstudien und der in Kapitel 2 dargestellten Literaturstudie werden nachfolgend die verfügbaren Methoden und Modelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Unterstützung einer systematische Analyse funktionsbestimmender Wirkzusammenhänge bewertet. Tabelle 4-4 zeigt diese Bewertung in einer Übersicht.

Tabelle 4-4: Eignung der untersuchten Methoden für eine induktiv-deduktive Funktionsanalyse und Synthese funktionsbestimmender Produkteigenschaften

	Anforderungen						
	Randbedingungen, Einflussgrößen & Zielgrößen ermitteln & modellieren	Quantitative Hypothesen über Wirkzusammenhänge bilden	Empirische Daten ermitteln	Empirische Daten auswerten & Wirkzusammenhänge quantifizieren	Gestaltungsideen deduktiv ableiten & vergleichend bewerten	Grafische Modellbildung, geringer Abstraktionsgrad	Geringer Anspruch an Werkzeuge und Methodenkompetenz
	I	II	III	IV	V	VI	VII
	induktiv-deduktives Vorgehen					Handhabung	
Ursache-Wirkung-Diagramm (ISHIKAWA)	+	-	-	-	-	O	+
Korrelationsmatrizen	+	O	-	-	-	-	O
Inter- & Multiple-Domain-Matrizen	+	O	-	-	O	-	O
Charcteristics Properties Model (WEBER)	O	O	-	-	O	O	O
Contact and Channel Approach (ALBERS)	+	O	-	-	O	+	O
Heuristiken zur Modellbildung (THAU)	+	O	O	O	O	+	O
Expertengespräche & Literaturstudien	O	O	+	O	-	O	O
Screening-Versuche	+	O	+	O	-	O	O
Design of Experiments (DoE)	+	O	+	-	-	-	-
Strukturgleichungsmodelle	-	+	-	+	-	O	-
Statistische Analysemethoden	O	-	-	+	-	-	-
Simulationsexperimente	-	-	+	+	-	+	-
Parameteroptimierungsverfahren	-	-	-	O	-	O	-
Legende:	+ erfüllt		O mit Einschränkungen erfüllt			- nicht erfüllt	

Die Bewertung basiert auf den in Kapitel 2 vorgestellten Methoden sowie den Beobachtungen des Autors in den Fallstudien I – VIII (siehe Kapitel 4.1 und 4.2). Die Anforderungsbereiche I – V beziehen sich auf eine etablierte Vorgehenssystematik zur Analyse von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen bei der Produkt- und Prozessoptimierung.⁶⁰⁹

Die Stärken der konstruktionsmethodischen Ansätze liegen demnach vorwiegend in der Ermittlung von Einfluss- und Zielgrößen sowie in der Bildung von qualitativen Hypothesen (Anforderungsbereiche I und II). Vor dem Hintergrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Barrieren und dem vielfältigen Angebot an Kreativitätstechniken bzw. assoziativen Lösungsverfahren endet ihr Einsatzbereich jedoch mit diesen Aktivitäten. Eine quantitative Funktionsanalyse, d. h. eine quantitative Formulierung und Überprüfung von Hypothesen über funktionsbestimmende Wirkzusammenhänge, ist mit den genannten Entwicklungsmethoden nur eingeschränkt möglich (Anforderungsbereiche III und IV). Derartige Aktivitäten fallen vielmehr in den Zuständigkeitsbereich des Design of Experiments (DoE) sowie der multivariaten statistischen Analysemethoden.

Durch die sich ergänzenden Profile der oben genannten Methoden liegt die Idee nahe, durch Kombination eine durchgängige Methodenunterstützung zu realisieren. Ein Beispiel dazu gibt die X-in-the-Loop Methodik von ALBERS et al., die numerische und statistische Analyseverfahren mit entwicklungsmethodischen Ansätzen⁶¹⁰ und physischen Prüfverfahren verbindet, um die Ursachen von einzelnen Wirkzusammenhängen bis hin zum komplexen Produktverhalten zu erklären und neue Gestaltungsideen daraus abzuleiten.⁶¹¹

In den begleiteten Fallstudien war die Statistik-Methodenkompetenz der begleiteten Entwicklungsingenieure jedoch nur gering ausgeprägt, sodass multivariate Analysemethoden (mit Ausnahme von Fallstudie III und V) nicht eingesetzt werden konnten. Hinzu kam, dass physischen Prüfverfahren zur Datenerhebung nur in Fallstudie III, V und VIII eingesetzt werden konnten. Diese eingeschränkte Anwendbarkeit statistischer Analyseverfahren beim Konstruieren zeigt den Bedarf für eine durchgängige Unterstützung durch Entwicklungsmethoden. Weil die Entwicklungsmethodik jedoch selbst Defizite im Bereich der quantitativen Funktionsanalyse aufweist (Anforderungsbereich IV), war es in den begleiteten Fallstudien notwendig, neue entwicklungsmethodische Wege zu finden,⁶¹² um die funktionsbestimmenden Konstruktionsparameter zu ermitteln und Gestaltungsideen daraus abzuleiten (Anforderungsbereich V).

⁶⁰⁹ vgl. Kleppmann 2013 S.17ff.

⁶¹⁰ z. B. mit dem Contact and Channel Approach (C&C²-A)

⁶¹¹ vgl. Albers 2008b, Düser 2010,

⁶¹² siehe Kapitel 5.3

Bezüglich Simulationsexperimenten und Parameteroptimierungsverfahren machte der Autor der vorliegenden Arbeiten in den Fallstudien II, VI und VII die Erfahrung, dass deren Stärken in einer numerischen Prognose bzw. Optimierung von Funktions- und Zustandseigenschaften liegen. Sie stellen jedoch (ebenso wie die genannten statistischen Analysemethoden) hohe Ansprüche an die Methodenkompetenz von Entwicklungsingenieuren. Dieser Aspekt wird in der Kategorie „Handhabung“ bewertet (Anforderungsbereiche VI und VII), in der auch der Abstraktionsgrad der Modellbildung berücksichtigt wird: Eine grafische Modellbildung mit einem möglichst konkreten Bezug auf die Gestalt eines Referenzsystems wird nur von wenigen Methoden explizit unterstützt.

Ergänzend zu dieser Bewertung wird in Abbildung 4.7 eine Unterscheidung der genannten Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur qualitativen bzw. quantitativen Modellbildung vorgenommen. Hieraus wird ersichtlich, dass in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur vorwiegend qualitative Methoden angeboten werden, deren Anwendungsgrenzen bereits bei einer einfachen quantifizierten Bewertung von Abhängigkeits- und Einflussbeziehungen erreicht sind.⁶¹³

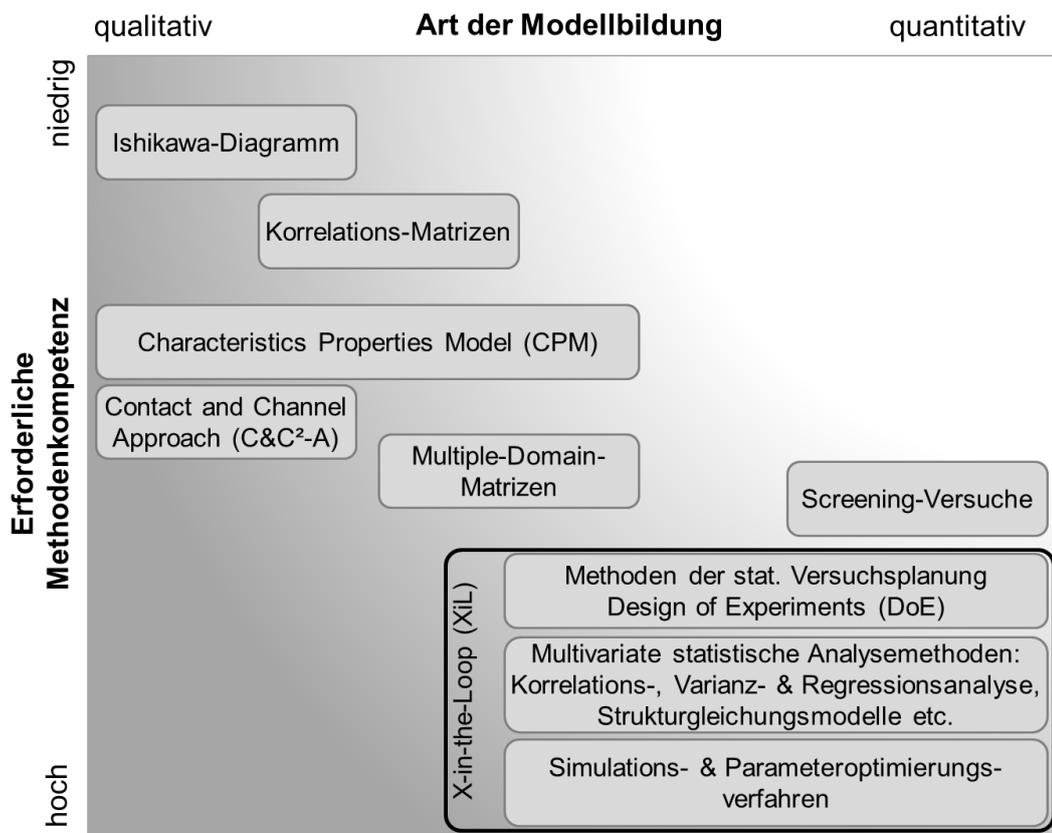


Abbildung 4.7: Portfolio der untersuchten Methoden zur Analyse multivariater Wirkzusammenhänge

⁶¹³ vgl. Kapitel 2.4.3

Im Kontrast zu diesen vorwiegend manuell ausführbaren Methoden stehen mathematische Spezialanwendungen, die mithilfe von numerischen Schätzverfahren und parametrischen Modellen für strukturprüfende Analysen⁶¹⁴ sowie zu Simulations- und Optimierungszwecken⁶¹⁵ eingesetzt werden. Sie ermöglichen zwar eine quantitative Modellbildung, setzen dafür jedoch eine umfangreiche Datenbasis und eine spezialisierte Methodenkompetenz voraus, die unter Entwicklungsingenieuren und insbesondere von Systemkonstruktoren nicht vorausgesetzt werden kann.

Die Erkenntnisse dieser Bewertung lassen grundsätzlich zwei Handlungsalternativen für die vorliegende Forschungsarbeit zu: Eine durchgängig qualitative und quantitative Modellbildung zur Analyse funktionsbestimmender Wirkzusammenhänge kann beispielsweise anhand einer fächerübergreifenden Kombination aus konstruktionswissenschaftlichen und statistischen Methoden realisiert werden. Hierbei werden jedoch erhebliche Anwendungsbarrieren für Systemkonstruktoren erwartet, die üblicherweise nicht über die erforderliche Methodenkompetenz im Bereich der Statistik verfügen.⁶¹⁶ Auf die Möglichkeit zur Nutzung statistischer Analysemethoden wird daher explizit hingewiesen, auf ihre Verwendung für den in Kapitel 5 beschriebenen Leitfaden zur Entwicklung von Gestaltungsideen wird jedoch bewusst verzichtet.

Als Alternative sollen die im Konstruktionskontext etablierten Modellierungstechniken für den hier adressierten Anwendungsfall um eine neu zu entwickelnde, quantifizierte Form der Modellbildung ergänzt und zu einer durchgängigen Vorgehenssystematik verknüpft werden. Damit sollen technische Wirkzusammenhänge strukturiert und so quantifiziert werden, dass eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen zur gezielten Verbesserung von Funktionseigenschaften möglich ist.

4.3.3 Potenziale einer induktiv-deduktiven Vorgehenssystematik

Die induktiv-deduktive Vorgehenssystematik wird in der vorliegenden Forschungsarbeit als eine Alternative zu einer intuitiv-assoziativen Entwicklung von Gestaltungsideen verstanden. Als Ergänzung zu opportunistischen Handlungsstrategien⁶¹⁷ fördert sie eine systematische Analyse und Synthese, indem sie die durchgängig explizite Modellbildung der kausalen Zusammenhänge von Funktion und Gestalt in den Mittelpunkt des Konstruierens stellt.

Die Bedeutung der Modellbildung wird hier besonders betont, denn Modelle stellen für Systemkonstruktoren ein zentrales Arbeitsmedium dar. Sie entfalten ihr Potenzial,

⁶¹⁴ vgl. Kapitel 2.5.3

⁶¹⁵ vgl. Prüfer 1982; DAKOTA 2013

⁶¹⁶ diese Annahme des Autors wurde in den empirischen Fallstudien ohne Einschränkung bestätigt

⁶¹⁷ vgl. Hacker 1997, 2002

wenn sie nicht nur punktuell angewendet, sondern in eine durchgängige Systematik eingebunden werden. Durch geeignete Kombination ergeben sich neue Möglichkeiten, um ein gezielt vertieftes Systemverständnis zu entwickeln und Gestaltungsideen zur Verbesserung von Funktionseigenschaften abzuleiten.

Die induktiv-deduktive Vorgehenssystematik vermittelt Systemkonstrukteuren eine prozessuale Struktur, an der sie ihr Vorgehen ausrichten können. Sie wird aus einer Verkettung von bewährten Handlungsstrategien⁶¹⁸ gebildet, die Konstrukteure in der Produktgenerationsentwicklung dabei unterstützen,

- Zusammenhänge von Funktion und Gestalt qualitativ zu bestimmen sowie die Grenzen des Gestaltungsraums und die dadurch erforderlichen Modelle der System-Umgebung über Connectoren zu definieren,
- Abhängigkeiten und Einflussbeziehungen zwischen Funktionen, Funktionseigenschaften und Konstruktionsparametern zu quantifizieren,
- Wissenslücken zu erkennen und relevantes Systemverständnis zu vertiefen,
- Hypothesen über Wirkzusammenhänge zu bilden und zu überprüfen,
- Gestaltungsideen deduktiv zu entwickeln und Lösungskonzepte funktional begründet auszuwählen, sowie
- Entscheidungswege bei der Gestaltung nachvollziehbar zu dokumentieren.

Der strukturelle Aufbau und die inhaltlichen Details dieser Vorgehenssystematik werden anhand von Empfehlungen zur Modellbildung im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

⁶¹⁸ vgl. Kapitel 2.2.2; vgl. Ehrlenspiel 2009 S.76

5 Deduktive Gestaltvariation beim Konstruieren

In diesem Kapitel werden Methoden und Modellierungstechniken beschrieben, die beim Konstruieren eine qualitative und quantitative Funktionsanalyse für eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen unterstützen. Die einzelnen Teilkapitel adressieren jeweils aufeinanderfolgende Aktivitäten der Gestaltvariation in der Produktgenerationsentwicklung,⁶¹⁹ bei denen die Wirkzusammenhänge für ausgewählte Funktionen und Eigenschaften eines technischen Referenzsystems analysiert und durch systematische Gestaltvariation verbessert werden.

Die einzelnen Methoden und Modellierungstechniken sind eingebunden in eine Vorgehenssystematik, die eine induktiv-deduktive Analyse und Synthese im Wechsel zwischen Empirie und Theorie beschreibt. Darin werden sowohl die neuen Erkenntnisse aus den empirischen Fallstudien dieser Arbeit als auch etablierte Modellierungstechniken der Konstruktionsmethodik mit einbezogen. Die Vorgehenssystematik ist grob in drei Teilbereiche gegliedert: Eine qualitative Funktionsanalyse, eine quantitative Funktionsanalyse und eine deduktive Synthese von Gestaltungsideen.

Zu Beginn einer Produktgenerationsentwicklung ist es oft hilfreich, eine *qualitative Funktionsanalyse* durchzuführen, um die bestehende Problemstellung zu strukturieren und die Wissens-Grundlage für das weitere Vorgehen zu legen. Hierbei wird das beabsichtigte Produktverhalten in Form von Funktionen und Funktionseigenschaften formuliert und mit der Wirk-Struktur eines Referenzprodukts und seiner Umgebungs-Systeme in Beziehung gesetzt. Die konstruktionswissenschaftliche Literatur bietet dazu verschiedene Methoden und Modellierungstechniken an, die auf Grundlage von empirischen Untersuchungen und theoretischer Modellbildung eine qualitative Bestimmung der funktionsrelevanten Konstruktionsparameter ermöglichen (Kapitel 5.2).

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf einer daran angeschlossenen, *quantitativen Funktionsanalyse* (Kapitel 5.3) und einer *deduktiven Synthese* von Gestaltungsideen (Kapitel 5.4). Es werden Methoden und Modellierungstechniken vorgestellt, die Systemkonstrukteure bei der Auswertung empirisch erhobener Daten unterstützen, um die funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter eines Gestaltungsproblems systematisch zu ermitteln. Ebenso wird gezeigt, dass durch eine systematische und auf Deduktion beruhende Variation dieser Parameter (korrigierendes Vorgehen) zu neuen Gestaltungsideen für die

⁶¹⁹ vgl. Albers 2015a

Produktgenerationsentwicklung führen kann. Die Arbeit schließt damit an die Arbeiten von ALBERS et al. zum X-in-the-Loop Ansatz an, die eine umfassenden Methodenunterstützung zur qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse zum Ziel haben.⁶²⁰

Das nachfolgende Teilkapitel gibt zunächst eine Übersicht über die Vorgehenssystematik, bevor im Anschluss die korrespondierenden Modellierungstechniken erläutert werden.

5.1 Systematik einer induktiv-deduktiven Gestaltvariation

Die nachfolgend in Abbildung 5.1 vorgeschlagene Vorgehenssystematik beschreibt eine problemorientierte Abfolge von Arbeitsschritten, die in ihren Grundzügen auf einer etablierten Vorgehenssystematik zur Analyse von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen bei der Produkt- und Prozessoptimierung beruhen.⁶²¹ Sie wurden in den beobachteten Fallstudien iterativ durchlaufen, um Wirkzusammenhänge zu analysieren und aus den gewonnenen Erkenntnissen Entwürfe zur Gestaltvariation abzuleiten.

Je nach Ausgangssituation und verfügbaren Ressourcen eines Entwicklungsprojekts kann der Schwerpunkt der einzelnen Arbeitsschritte stärker auf einer qualitativen oder einer quantitativen Funktionsanalyse liegen. Die Abfolge der Arbeitsschritte sollte nicht streng präskriptiv ausgelegt, sondern je nach Bedarf iterativ und flexibel ausgelegt werden. Bereits in den Kapiteln 2.2.2 und 2.2.3 wurde festgestellt, dass beim Konstruieren eine lokal fokussierte Vorgehensweise in Verbindung mit einem hypothesengeleiteten Vor- und Zurückspringen zwischen verschiedenen Arbeitsschritten im Sinne eines problemorientierten Vorgehens zu empfehlen ist.

Zentraler Bestandteil der vorgeschlagenen Vorgehenssystematik ist ein ständiger Wechsel zwischen Empirie und Theorie, um die Entwicklung eines umfangreichen Systemverständnisses zu fördern. Bei *empirischen Untersuchungen* werden durch Versuche, Simulationsexperimente, Expertengespräche und Literaturstudien jeweils neue Informationen gesammelt und Erkenntnisse gewonnen, die anschließend durch eine *theoretische Modellbildung* systematisch aufbereitet und ausgewertet werden. Die einzelnen Arbeitsschritte sind von qualitativen und quantitativen Analyseschritten und von anschließenden Syntheseschritten geprägt:

⁶²⁰ vgl. Albers 2014b, Albers 2014c

⁶²¹ vgl. Kleppmann 2013 S.17ff.

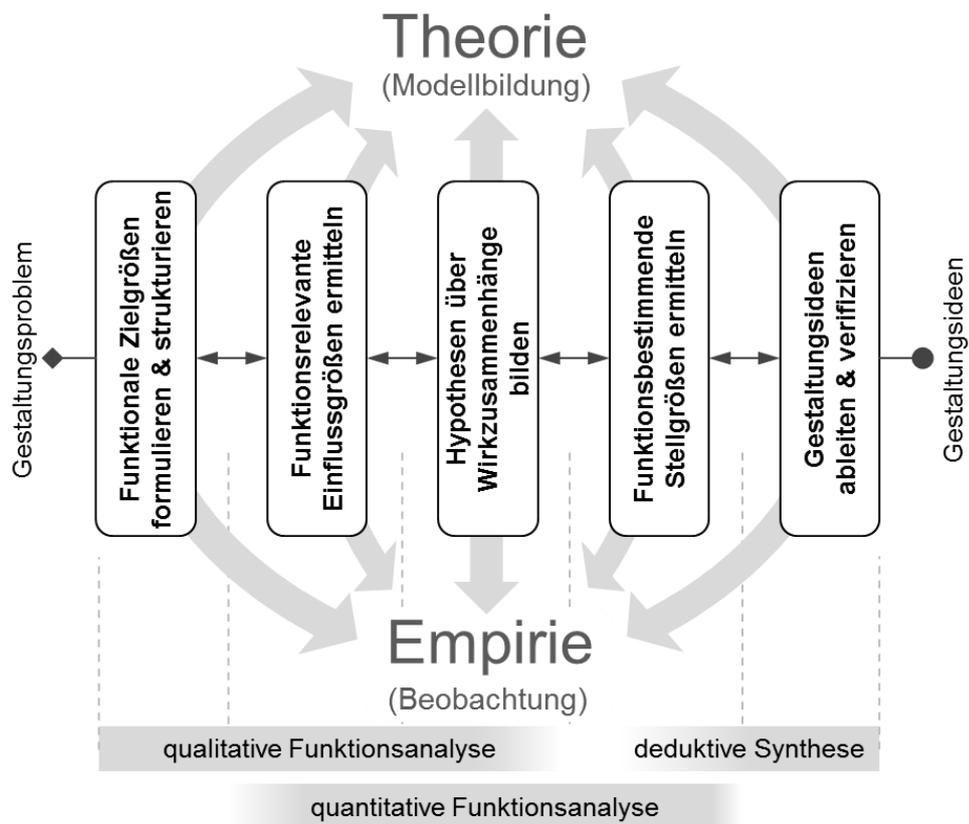


Abbildung 5.1: Vorgehenssystematik zur deduktiven Entwicklung von Gestaltungsvorschlägen

Das Ziel der *qualitativen Funktionsanalyse* (durch Expertengespräche und Literaturstudien) ist eine möglichst ganzheitliche und realistische Darstellung der Relationen zwischen funktionalen Zielgrößen und jenen Gestalt- und Prozessparametern, die diese Zielgrößen beeinflussen. Ihre Stärke liegt in der Entwicklung einer Übersicht über komplexe Zusammenhänge sowie in der Ableitung von Hypothesen über funktionsrelevante Wirkzusammenhänge aus theoretischen Überlegungen und empirischen Beobachtungen. Häufig wird ein wechselseitiges Vorgehen zwischen empirischen und theoretischen Analysemethoden angewendet, wodurch das bestehende Systemverständnis über die Vorgänge und Zustände der Funktionserfüllung iterativ präzisiert und erweitert wird. Hierbei stehen einerseits Beobachtungen bzw. Messungen und andererseits die Datenauswertung und Modellbildung im Fokus.

Das Ziel der *quantitativen Funktionsanalyse* ist die Beobachtung oder Prognose des Verhaltens eines Referenzprodukts oder eines Teilsystems in der Anwendung (z. B. mithilfe von Versuchen und Simulationsexperimente), sodass Hypothesen überprüft sowie Zusammenhänge und Ausprägungen möglichst exakt bestimmt werden können. Aus der dabei aufgenommenen Datenbasis können erneut Hypothesen

gebildet oder präzisiert, sowie eine Unterscheidung zwischen funktionsrelevanten und funktionsbestimmenden Einflussgrößen vorgenommen werden. Die quantitative Funktionsanalyse folgt meist einem linearen Vorgehen,⁶²² bei dem eine anfangs formulierte Hypothese anhand von Daten verifiziert oder falsifiziert wird. Unter der Voraussetzung einer sorgfältigen Durchführung und Auswertung liegen ihre Stärken in der Objektivität und Reliabilität, sofern eine ausreichend große Stichprobenzahl zugrunde gelegt ist. Auch hier stehen also einerseits die Beobachtungen bzw. Messungen und andererseits die Datenauswertung und Modellbildung im Fokus.

Das Ziel der *deduktiven Synthese* von Gestaltungsideen liegt in der Entwicklung von konstruktiven Maßnahmen, mit denen die Ausprägungen ausgewählter Funktionen und Funktionseigenschaften in beabsichtigter Weise verbessert werden. Sie beruht auf Schlussfolgerungen aus den Erkenntnissen der vorangegangenen qualitativen und (insbesondere) der quantitativen Funktionsanalyse. Ihr Fokus liegt in der gezielten Spezifikation von einzelnen Gestaltungsmaßnahmen unter Beibehaltung eines bewährten Wirkprinzips, sodass möglichst nur die gewünschten Funktionen und Funktionseigenschaften adressiert und der Änderungsaufwand am Produkt und seinen Fertigungsprozessen weitgehend reduziert werden. Um dies zu überprüfen, müssen entsprechende Versuche oder Simulationsexperimente durchgeführt werden. Beobachtungen bzw. Messungen und die Datenauswertung bzw. korrigierende Modellbildung stehen also auch hier im Fokus.

Die vorgeschlagene Struktur der Vorgehenssystematik stellt eine logische Abfolge von Aktivitäten dar, die im Kontext des „*integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*“⁶²³ der „*Modellierung von Prinzip und Gestalt*“ zugeordnet sind (Abbildung 5.2 links). Sie werden iterativ durchlaufen (Abbildung 5.2 rechts), wobei durch empirische Beobachtungen und theoretische Modellbildung schrittweise ein vertieftes Systemverständnis und sachlogisch begründete Gestaltungsideen erarbeitet werden. Diese Gestaltungsideen zeigen auf, wie bestimmte Funktionen und Funktionseigenschaften eines Referenzprodukts durch eine gezielte Gestaltvariation verbessert werden könnten. Die Aktivität „*Ideenfindung*“ im iPeM bezeichnet dagegen die Entwicklung ganzheitlicher Lösungsideen⁶²⁴ für eine neue Produktgeneration auf Basis des initialen Zielsystems. Diese ganzheitlichen Lösungsideen können z. B.

⁶²² Hypothese – Versuche und Simulationen – Datenaufbereitung und -auswertung – Schlussfolgerung

⁶²³ vgl. Albers 2011a, Albers 2011b

⁶²⁴ Eine ganzheitliche Lösungsidee gibt nach ALBERS einen Ausgangsimpuls für gestalterische Arbeiten an den Baugruppen und Bauteilen eines Referenzprodukts. Sie zeigt auf, wie Funktionen neu oder in neuer Qualität erfüllt werden können, ohne dabei jedoch schon die konkreten Gestaltungsideen zur konstruktiven Umsetzung vorwegzunehmen. Ein Beispiel aus Fallstudie IV lautet: *Ein stufenloser Arretierungs-Mechanismus (ganzheitliche Lösungsidee) an einem Restgitterhebel (Referenzprodukt), der einen Produktionsmitarbeiter beim Anheben großer, zugeschnittener Bleche ergonomisch unterstützt.* Eine tragfähige Bewertung einer Lösungsidee wird erst durch weitere Aktivitäten der „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ sowie der „Verifizierung und Validierung“ möglich – z. B. mithilfe physischer und virtueller Prototypen.

durch eine vergleichende Analyse von technisch affinen Referenzprodukten aus anderen Anwendungen und Branchen hergeleitet werden.

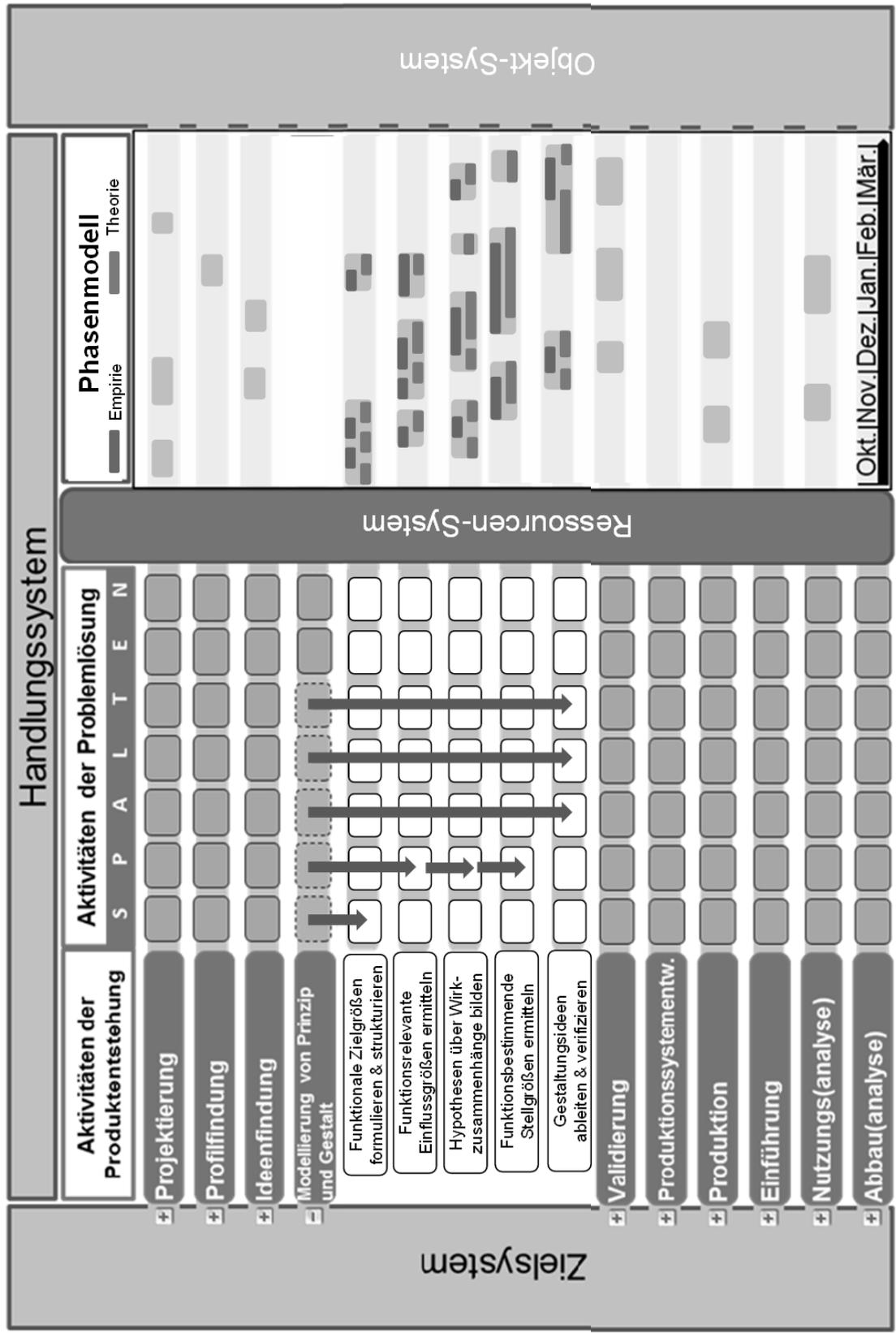


Abbildung 5.2: Iterativer Wechsel von Aktivitäten zur Datenerhebung und -Auswertung (Empirie) sowie zur Modellbildung (Theorie) beim Modellieren von Prinzip und Gestalt

Die vertikalen Pfeile in Abbildung 5.2 links deuten an, dass mit den vorgestellten Aktivitäten insgesamt die ersten fünf SPALTEN-Schritte der „*Modellierung von Prinzip und Gestalt*“ durchlaufen werden.⁶²⁵ Um diese Schritte methodisch zu unterstützen, werden den einzelnen Aktivitäten korrespondierende Methoden und Werkzeuge zuzuordnen,⁶²⁶ die bedarfsgerecht abgerufen werden können, z. B.

- nach dem Kriterium, welche Aktivität der Problemlösung innerhalb eines Arbeitsschrittes unterstützt werden soll (z. B. ein Ishikawa-Diagramm⁶²⁷ für „P = Problemeingrenzung“ und „A = alternative Lösungen entwickeln“ in der Aktivität „Funktionsrelevante Einflussgrößen ermitteln“);
- nach dem konkreten Zweck der Methodenanwendung (z. B. C&C²-Modelle,⁶²⁸ um funktionsbestimmende Gestalteeigenschaften zu ermitteln);
- nach den vorherrschenden Randbedingungen (z. B. eine Cluster-Trend-Analyse,⁶²⁹ weil die verfügbaren Messdaten für eine statistische Auswertung nicht geeignet sind).

In Abbildung 5.3 in Kapitel 5.1.6 wird eine solche Zuordnung von Arbeitsschritten zu Methoden und Modellierungstechniken vorgestellt. Der im Anhang 1 beschriebene Leitfaden zeigt die wichtigsten Entscheidungswege für die Methodenauswahl auf.

5.1.1 Funktionale Zielgrößen formulieren und strukturieren

Zu Beginn der Vorgehenssystematik steht zunächst die Formulierung und Strukturierung der funktionalen Zielgrößen, die z. B. durch Variation der Produktgestalt verbessert werden sollen. Die dazu benötigten Informationen können aus dem initialen Zielsystem⁶³⁰ eines Entwicklungsprojekts entnommen werden. LINDEMANN formuliert dazu: „*Zunächst muss man sich im Klaren sein, welche Eigenschaften genau analysiert werden sollen. Dabei ist es sinnvoll, die in der aktuellen Situation wichtigsten Eigenschaften zu ermitteln und sich bei der Analyse auf diese zu beschränken.*“⁶³¹

Es sollte darauf geachtet werden, dass möglichst konkrete, mess- oder beobachtbare Funktionen und Funktionseigenschaften als Zielgrößen formuliert werden, die als Indikator für die gewünschte Qualität der Funktionserfüllung geeignet sind. Mithilfe von Diagrammen und Matrizen können Zielgrößen strukturiert und in Beziehung

⁶²⁵ vgl. Albers 2005: S – Situationsanalyse, P – Problemeingrenzung, A – alternative Lösungen entwickeln, L – Lösungen auswählen und T – Tragweitenanalyse

⁶²⁶ In Abbildung 5.2 sind diese Methoden und Werkzeuge „virtuell“ in den sieben Kacheln rechts neben den einzelnen Arbeitsschritten hinterlegt, vgl. Albers 2011b, Albers 2015b

⁶²⁷ vgl. Kern 2009

⁶²⁸ vgl. Albers 2014

⁶²⁹ siehe Kapitel 5.3.2

⁶³⁰ vgl. Albers 2010, Albers 2011b

⁶³¹ Lindemann 2009 S.159

zueinander gesetzt werden, um Abhängigkeiten und Einflussbeziehungen zu analysieren (→ Kapitel 5.2.1). Sofern die geforderten Zielgrößen in Versuchen und Simulationsexperimenten nicht unmittelbar beobachtet werden können, ist es erforderlich, geeignete Ersatzgrößen zu definieren. Beispiele für funktionale Zielgrößen aus den initialen Zielsystemen der empirischen Fallstudien können aus der Tabelle 4-3 in Kapitel 4.2.1 entnommen werden.

5.1.2 Funktionsrelevante Einflussgrößen ermitteln

Für die festgelegten funktionalen Zielgrößen ist es erforderlich, Annahmen über die funktionsrelevanten Einfluss- und Störgrößen zu bilden. Durch diese systematische Problemeingrenzung wird das Ziel verfolgt, Analyseschwerpunkte zu bilden, sodass nicht alle Gestalt- und Prozessparameter hinsichtlich ihres Funktionseinflusses untersucht werden müssen. Dies kann meist nur in einem iterativen Prozess unter Einbeziehung von abteilungsübergreifenden Erfahrungswerten, Expertengesprächen, Literaturstudien,⁶³² sowie anhand von Beobachtungen aus der Anwendung bzw. aus Versuchen geschehen.

Die wesentliche Herausforderung besteht zunächst in der Definition der zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen, die den Betrachtungsbereich der Funktionsanalyse bestimmt. Sie sollte so gewählt werden, dass all jene Einflussgrößen berücksichtigt werden können, die in den relevanten Betriebszuständen die Beschaffenheit der funktionserfüllenden Wirk-Netze⁶³³ im Referenzprodukt und ihre Wechselwirkungen mit den interagierenden Umgebungs-Systemen charakterisieren.

Sofern im Kontext der Produktgenerationsentwicklung bereits Modelle über die interessierenden Wirkzusammenhänge eines Referenzprodukts vorliegen, sollte die Möglichkeit der Wiederverwendung geprüft werden. Interessierende Informationen können dadurch ggf. leicht ermittelt und die Funktionsanalyse stark verkürzt werden. Ebenso bietet es sich im Umkehrschluss an, das bestehende Modellportfolio mit neu ermittelten Erkenntnissen zu erweitern, sofern ergänzende empirische Untersuchungen durchgeführt werden mussten.

Falls dazu Versuche und Simulationsexperimente erforderlich und einfach möglich sind, können die von THAU formulierten „*Heuristiken zur Bestimmung von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen*“ einen Beitrag zu einer *qualitativen* Funktionsanalyse leisten.⁶³⁴ Sie sollen Systemkonstrukteure dabei unterstützen, mit

⁶³² z. B. Checklisten, Statistiken, Prüfprotokolle, dokumentierte FMEAs, wiss.-techn.Fachartikel etc.

⁶³³ Ein Wirk-Netz wird in der Sprache des *Contact and Channel-Approach* aus den Wirkflächenpaaren, Leitstützstrukturen und Connectoren gebildet, die in einem Betriebszustand an der Erfüllung einer Funktion beteiligt sind. Vgl. Albers 2014a S.160

⁶³⁴ vgl. Thau 2013 S.107ff.

Modellen und Prototypen die funktionsrelevanten Wirkorte eines technischen Referenzprodukts zu ermitteln. Alternativ dazu können die in Kapitel 5.1.4 genannten Methoden und Modellierungstechniken genutzt werden, um mit einer *quantitativen* Funktionsanalyse funktionsbestimmende Einflussgrößen zu ermitteln, ohne dass ein qualitatives Vorwissen über Wirkzusammenhänge erforderlich ist.⁶³⁵ ALBERS et al. zeigen exemplarisch im X-in-the-Loop Ansatz⁶³⁶, wie sich durch eine Kopplung von Simulationsexperimenten und Versuchen⁶³⁷ auch komplexe Wirkzusammenhänge quantitativ analysieren lassen, um neue Erkenntnisse z. B. über ein in Vorgängerprodukten ungelöstes Problem (wie das Rasseln eines Getriebes oder das Rupfen einer Kupplungen) zu ermitteln. Voraussetzung dafür ist jedoch das Vorhandensein der entsprechenden quantitativen Modelle, die die relevanten Eigenschaften bzw. das Verhalten der Umgebungs-Systeme und der angrenzender Baugruppen in den betrachteten Anwendungsfällen abbilden. In vielen Unternehmen ist diese Voraussetzung heute noch nicht gegeben.

Sofern Versuche und Simulationsexperimente nicht oder nur vereinzelt zur Verfügung stehen, ist eine *qualitative* Funktionsanalyse auf Basis von Expertengesprächen und Literaturstudien unumgänglich, um ein ausreichendes Systemverständnis zur Entwicklung von Gestaltungsideen zu erarbeiten.

Mithilfe der ermittelten Informationen aus empirischen Beobachtungen, Befragungen, Recherchen und Versuchen ist es meist möglich, erste Modelle der interessierenden Wirkzusammenhänge zu erstellen. Hierbei sind sowohl die Gestalteigenschaften als auch die Zustandseigenschaften und Prozessparameter der an der Funktionserfüllung beteiligten Umgebungs-Systeme sowie natürlich der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen im Gestaltungsbereich in den interessierenden Betriebszuständen zu berücksichtigen. Aufgrund der Komplexität⁶³⁸ der Wirkzusammenhänge ist es meist erforderlich, sie durch eine geeignete Modellbildung zu strukturieren und zu visualisieren. Je nach Zweck der Modellbildung werden dazu *Systemstrukturdiagramme*, *Contact and Channel Modelle*, *Ursache-Wirkungs-Diagramme*, *Inter- und Multiple-Domain-Matrizen*, *Einflussgrößen-Zielgrößen-Matrizen* oder auch *Prozessablaufdiagramme* verwendet (→ Kapitel 5.2). Die Auswahl geeigneter Methoden sollte sich nach ECKERT danach richten, auf welcher Abstraktionsebene analysiert wird: „Bei einer zu hohen Flughöhe werden wichtige Details unterschlagen, bei zu vielen Details geht leicht die Übersicht

⁶³⁵ Dieses Vorgehen wurde in den Fallstudien III, V und VI praktiziert. Vgl. Stürtzel 2012, Stemmler 2013, Kubel 2013 (betreute Abschlussarbeiten)

⁶³⁶ vgl. Albers 2014b, Albers 2014c

⁶³⁷ z. B. durch Wiederverwendung numerischer Modelle von Umgebungs-Systemen oder Baugruppen aus Vorgängerprodukten und deren Kopplung mit physischen Funktionsprototypen im Versuch

⁶³⁸ Die Komplexität ergibt sich hier aus der Anzahl, der Vielfalt und den Abhängigkeitsbeziehungen der einzelnen Parameter.

verloren.“⁶³⁹ Je genauer eine Analyse durchgeführt wird, desto detaillierter können Informationen erhoben werden, jedoch steigt dadurch gleichzeitig der Zeit- und Kostenbedarf.

LINDEMANN empfiehlt daher, zunächst Schätzverfahren auf Basis von Erfahrungswissen einzusetzen, sodass die Analyse an besonders relevanten Stellen vertieft werden kann. *„Dem Grundprinzip der Problemzerlegung folgend empfiehlt es sich, komplexe Sachverhalte zu unterteilen und die Eigenschaften von Subsystemen losgelöst vom Gesamtkontext zu betrachten.“*⁶⁴⁰ Eine Fokussierung muss jedoch bewusst und begründet erfolgen, denn andernfalls besteht die Gefahr, dass relevante Einflussgrößen unerkannt ausgeschlossen, mögliche Relationen vernachlässigt und Schlussfolgerungen unter falschen oder nur unvollständigen Annahmen getroffen werden. ALBERS plädiert daher nicht für eine vom Gesamtkontext losgelösten, sondern für eine in den Kontext integrierten Teilbetrachtung einzelner Teilprobleme. In der Modellbildung *müssen* die Eigenschaften und das Verhalten der Umgebungs-Systeme, z. B. durch ein Freischneiden der interessierenden Baugruppe und durch Verwendung von Connectoren, berücksichtigt werden.⁶⁴¹

Die Auswahl der zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen sowie der vermuteten Einflussgrößen sollte vor diesem Hintergrund mit einer besonderen Sorgfalt durchgeführt und im Projektverlauf kontinuierlich validiert werden. Die Systemgrenzen bestimmen den Fokus und Betrachtungsbereich für alle nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritte der vorgeschlagenen Vorgehenssystematik.

5.1.3 Hypothesen über Wirkzusammenhänge bilden

Auf der Grundlage der ermittelten Zielgrößen des Konstruktionsprojekts sowie den Annahmen und Erkenntnisse über funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter können in nachfolgenden Schritten Hypothesen über mögliche Wirkzusammenhänge gebildet werden. Sie beschreiben Annahmen, die man für möglich hält, die aber nicht verifiziert sind. Sie sind nur gültig für die ergänzend angegebenen Bedingungen, z. B. für einen bestimmten Anwendungsfall.

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 dargelegt wurde, können Hypothesen – je nach vorhandenem Systemverständnis – auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen formuliert und im Projektverlauf kontinuierlich präzisiert werden. Das Spektrum möglicher Thesen und Hypothesen reicht dabei

⁶³⁹ Eckert 2010; Thau 2013 S.93 schlägt daher ein Vorgehen gemäß einer Kammstruktur vor.

⁶⁴⁰ Lindemann 2009 S.164

⁶⁴¹ vgl. Albers 2014a S.160ff.

- von einer (vagen) Vermutung, dass bestimmte Systemgrößen oder Systemelemente an der Funktionserfüllung beteiligt sind, oder dass Einflüsse von Umgebungssystemen (Kräfte, Energien, Informationen, Stoffe) in nicht näher bekannter Form zu dem beobachteten Verhalten führen,
- bis zu der Annahme, dass eine Variation der Ausprägung eines bestimmten Gestalt- oder Prozessparameters die Ausprägung der interessierenden Funktionseigenschaft in einer gewünschten Weise verändern könnte.

Beispiel: „Neben der maximalen Winkelbeschleunigungsamplitude [der Motordrehzahl] gibt es weitere Systemgrößen, die einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Beschleunigungspegel des Leerlaufresselns eines manuellen Schaltgetriebes haben.“⁶⁴²

Beispiel: „Je kleiner die Spitzenbreite [einer Schraube], umso geringer ist auch die Einschraubzeit.“⁶⁴³

Sofern anhand der bekannten Einflussgrößen eine Hypothesenbildung problematisch ist, stehen zwei alternative Vorgehensweisen zur Auswahl: Eine Möglichkeit besteht in einem Wechsel von der theoretischen, qualitativen Modellbildung zu empirischen, quantitativen Untersuchungen (Versuche und Simulationsexperimente). Dadurch können bereits qualitativ bekannte Wirkzusammenhänge quantifiziert und mithilfe struktorentdeckender Verfahren weitere Einflussgrößen ermittelt werden (→ Kapitel 5.1.4). Eine andere Möglichkeit besteht in der genaueren Bestimmung der Einflussgrößen und Stellgrößen durch sachlogische Überlegungen. Dazu werden die untersuchten Betriebszustände detaillierter beschrieben und die bisher in Connectoren repräsentierten Umgebungs-Systeme zunächst detaillierter beschrieben, um deren funktionsrelevante (aber bisher offenbar unbekannte oder aber bewusst aus Gründen der Komplexitäts-Reduktion ausgeklammerte) Einflussgrößen zu erfassen und in den Betrachtungsbereich zu übernehmen.

Eine kontinuierliche Dokumentation der ermittelten Hypothesen und deren Zuordnung zu den betreffenden Betriebszuständen unterstützt eine systematische Planung von Maßnahmen zu ihrer Überprüfung.

Wie bereits in Kapitel 4.3.2 dargelegt wurde, endet der Anwendungsbereich konstruktionsmethodischer Modellierungstechniken meist mit der Bildung von

⁶⁴² Freudenmann 2014 S.134

⁶⁴³ Thau 2013 S.138

Hypothesen über Wirkzusammenhänge. Im weiteren Verlauf müssen daher alternative Verfahren zur Quantifizierung der Einflussbeziehungen ausgewählt und mit den verwendeten qualitativen Modellierungstechniken kombiniert werden.

5.1.4 Funktionsbestimmende Stellgrößen ermitteln

Die Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen durch Bewertung von Wirkzusammenhängen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine gezielte Beeinflussung der technischen Eigenschaften eines Produkts. Die vorhandenen Vorkenntnisse aus vorangegangenen Arbeitsschritten bestimmen, ob dazu strukturprüfende oder strukturentdeckende Methoden eingesetzt werden sollten.

In Kapitel 2.5.3 wurde bereits erläutert, dass in der Statistik verschiedene mathematische Analyseverfahren zur Suche nach und Überprüfung von Korrelationsbeziehungen existieren. Voraussetzung für Ihre Anwendung ist die Möglichkeit zur Durchführung von Versuchen. Die Nutzung dieser Verfahren hat in der Produktentwicklung bislang nur eine eingeschränkte Verbreitung gefunden, da sie besondere Anforderungen an die Methodenkompetenz der Anwender stellen.

Als pragmatische Alternative dazu formuliert THAU Heuristiken zur „*Verknüpfung von Funktions- und Gestalteeigenschaften*“, die Systemkonstruktoren bei der Planung ihrer Vorgehensweise als Leitfaden dienen sollen.⁶⁴⁴ Sie beschreiben ein exploratives Vorgehen zur Variation von Gestalteeigenschaften oder der Anzahl von Wirkflächenpaaren. Dabei setzen sie voraus, dass Versuche und Simulationsexperimente mit Modellen oder Prototypen eines Referenzprodukts durchgeführt werden können.

Ergänzend zu diesen methodischen Empfehlungen werden in Kapitel 5.3 der vorliegenden Forschungsarbeit drei Modellierungstechniken zur quantifizierten Modellierung von Wirkzusammenhängen entwickelt. Sie ermöglichen eine grafische Darstellung und einen numerischen Vergleich komplexer technischer Wirkzusammenhänge, um funktionsbestimmende Stellgrößen für die Konstruktion zu bestimmen. In Tabelle 5-1 ist der Anwendungsbereich der Einflusspfad-, der Cluster-Trend- und der Einflussmatrixanalyse dargestellt. Eine detaillierte Erläuterung der Modellierungstechniken erfolgt in Kapitel 5.3.

⁶⁴⁴ vgl. Thau 2013 S.133ff.

Tabelle 5-1: Einordnung der in Kapitel 5.3 vorgestellten Modellierungstechniken zur Bestimmung und Quantifizierung von Wirkzusammenhängen

Gewählte Form der empirischen Datenerhebung:	Qualitative Hypothesen oder Vorkenntnisse über Einflussbeziehungen sind:	
	vorhanden	nicht vorhanden
Versuche und Simulationsexperimente (quantitativ)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einflusspfad-Analyse zur Versuchsplanung ▪ Cluster-Trend- und Cluster-Matrix-Analyse zur Auswertung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cluster-Trend-Analyse ▪ Cluster-Matrix-Analyse
Expertengespräche und Literaturstudien (qualitativ)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einflusspfadanalyse ▪ Einflussmatrix-Analyse 	Qualitative Funktionsanalyse (Kapitel 5.2)

Sofern bereits Hypothesen oder Vorkenntnisse über Einflussbeziehungen aus vorangegangenen Arbeitsschritten vorliegen, können Methoden zur Quantifizierung von Wirkzusammenhängen eingesetzt werden. Die dazu erforderliche Datenbasis kann entweder anhand von Versuchen und Simulationsexperimenten, oder mithilfe von Expertengesprächen und Literaturstudien erhoben werden. Zu beachten ist, dass abhängig von dem gewählten Verfahren und der Stichprobenzahl die Objektivität und die Reliabilität der Daten und damit der Analyseergebnisse beträchtlich variieren können. Alternativ oder ergänzend zu den in Tabelle 5-1 aufgeführten Modellierungstechniken können die in Kapitel 2.5.3 erläuterten statistischen Analysemethoden verwendet werden.

Sofern *keine* Hypothesen oder Vorkenntnisse über Einflussbeziehungen aus vorangegangenen Arbeitsschritten vorliegen, besteht die einzige Möglichkeit zur Bestimmung von Wirkzusammenhängen darin, Daten anhand von Versuchen zu erheben und mit explorativen, *strukturentdeckenden* Methoden auszuwerten. Da eine Fokussierung der Systemanalyse im Vorfeld nicht vorgenommen wurde, ist mit einem tendenziell höheren Aufwand zu rechnen als bei strukturprüfenden Methoden. Zur Vermeidung vollfaktorieller Versuchsreihen können Screening-Versuche oder Methoden der statistischen Versuchsplanung eingesetzt werden.⁶⁴⁵ Sofern eine quantitative Datenerhebung nicht möglich ist, wird eine Anwendung der in Kapitel 5.1.2 erläuterten Methoden zur Bestimmung funktionsrelevanter Einflussgrößen empfohlen.

Ziel der Bestimmung und Quantifizierung von Wirkzusammenhängen ist eine Unterscheidung von (nicht) funktions*relevanten* und funktions*bestimmenden* Gestalt- und Prozessparametern. Hierzu ist eine Bewertung der ermittelten

⁶⁴⁵ vgl. Kapitel 2.5.3

Wirkzusammenhänge erforderlich. Diese erfolgt anhand der Einflussstärke, die einzelne Parameter auf die Qualität der Funktionserfüllung haben. Die Einflussstärke kann in Versuchen oder Simulationsexperimenten ermittelt werden, indem die Ausprägungen von Einflussgrößen variiert und die Auswirkungen auf die Qualität der Funktionserfüllung beobachtet werden.

In der Statistik erfolgt die Bewertung von Wirkzusammenhängen anhand von Koeffizienten, die in einer mathematischen Formel als Faktoren vor die Einflussgrößen gestellt sind (→ Formel [2.1] in Kapitel 2.5.3). Direkt dazu vergleichbare Ansätze sind in der konstruktionsmethodischen Literatur bislang lediglich auf der Basis qualitativer oder semiquantitativer Schätzverfahren zu finden, beispielsweise bei einer gewichteten Punktbewertung wie der Nutzwertanalyse,⁶⁴⁶ einer Portfolioanalyse oder einer Korrelationsmatrix.⁶⁴⁷ Ziel der in Kapitel 5.3 vorgestellten Modellierungstechniken ist dagegen eine vergleichende Bewertung von Wirkzusammenhängen sowohl dann zu ermöglichen, wenn nur erfahrungsbasierte Aussagen möglich sind, als auch in solchen Fällen, in denen objektive Messergebnisse zur Analyse herangezogen werden können.

5.1.5 Gestaltungsideen deduktiv ableiten und verifizieren

Bei der Ausführung der vorgenannten vier Arbeitsschritte (in typischerweise mehreren Iterationen) können Anwender nach und nach ein vertieftes Systemverständnis und explizite Modelle entwickeln, die Rückschlüsse auf funktionsbestimmende Einflussgrößen zulassen. Durch Variation dieser Einflussgrößen, z. B. der Beschichtung, der Kontur oder der Oberflächenbeschaffenheit eines Wirkflächenpaares, können Schlussfolgerungen darüber gezogen werden, in welcher Weise eine Funktion oder Funktionseigenschaft beeinflusst werden kann.

Das in der vorliegenden Forschungsarbeit adressierte Vorgehensmodell adressiert die Absicht, bestehende Wirkprinzipien von Referenzprodukten beizubehalten und durch Gestaltvariation, d. h. durch gezielte Modifikationen an einzelnen funktionsbestimmenden Stellgrößen, die Leistungsfähigkeit und Qualität der Funktionserfüllung eines technischen Produkts zu steigern. Das Ziel ist dabei die Realisierung neuer Differenzierungsmerkmale bei einem (gegenüber der Entwicklung völlig neuer Lösungskonzepte) deutlich reduzierten Änderungsaufwand.

In der Konstruktionspraxis werden zu diesem Zweck typischerweise Prognose- und Messdaten aus Simulationsexperimenten und Versuchen in Diagrammen, Formeln

⁶⁴⁶ vgl. Kapitel 2.4.3

⁶⁴⁷ vgl. Kapitel 2.5.2

und Tabellen visualisiert und (manuell) ausgewertet.⁶⁴⁸ In grafischen Darstellungsformen können jedoch meist nur einzelne Einflussbeziehungen quantitativ und nach dem Prinzip der Mustererkennung miteinander verglichen werden, z. B. in einem Punkte- bzw. Streudiagramm. Tabellarische Modellierungstechniken eignen sich dagegen besser für eine numerische Auswertung, da sie sowohl mathematische Operationen als auch grafische Darstellungen ermöglichen. In Kapitel 5.3 werden Empfehlungen zu einer kombinierten, grafischen und tabellarischen Modellbildung gegeben, um funktionsbestimmende Gestalteigenschaften zu ermitteln.

Abgesehen von sachlogisch geschlussfolgerten Gestaltungsvorschlägen entstehen Gestaltungsideen typischerweise durch Assoziation bereits im Verlauf der vorgenannten Analyseschritte. Diese „spontanen Gestaltungsideen“ sollten nach Möglichkeit nicht – wie bei einem opportunistischen Vorgehen⁶⁴⁹ naheliegend – unmittelbar weiterverfolgt und ausdetailliert, sondern zunächst in einem Ideenspeicher⁶⁵⁰ gesammelt werden.⁶⁵¹ Die Stärke dieser assoziativen Gestaltungsideen liegt meist im Querdenken mit einem geringen Aufwand zur Ideengenerierung.⁶⁵² Als Nachteil kann dagegen angeführt werden, dass bei einem assoziativen Vorgehen nicht notwendigerweise brauchbare Gestaltungsideen entstehen. Ebenso werden dabei häufig etablierte Wirkprinzipien durch alternative Lösungskonzepte ersetzt, anstatt vorhandene Funktionspotenziale durch einzelne, gezielte Gestaltungsmaßnahmen besser auszuschöpfen.⁶⁵³

Eine intuitiv-assoziative Ideengenerierung kann sowohl während als auch zwischen den jeweiligen Arbeitsschritten der vorgeschlagenen Vorgehenssystematik (→ Abbildung 5.1) stattfinden, wenn methodische Barrieren eine systematische Vorgehensweise blockieren. In den empirischen Fallstudien der vorliegenden Arbeit wurde beobachtet, dass der Neuheitsgrad einer Lösung, d.h. die konstruktiven Abweichungen von einem bestehenden Lösungsprinzip, tendenziell höher ist, je früher die deduktive Vorgehenssystematik unterbrochen oder für eine assoziative Lösungssuche verlassen wird. Je weiter ein Problemlösungsprozess hingegen nach der beschriebenen Vorgehenssystematik fortgeschritten ist, desto umfangreicher ist das verfügbare Systemverständnis. Mit zunehmendem Systemverständnis steigt auch die Möglichkeit, eine Lösung durch einzelne gezielte Variationen an der

⁶⁴⁸ vgl. Abbildung 2.17 in Kapitel 2.5.2

⁶⁴⁹ vgl. Kapitel 2.2.2

⁶⁵⁰ ALBERS betont den Nutzen eines solchen Kontinuierlichen Ideenspeichers (KIS) für alle Problemlösungs-Vorgänge und integriert ihn daher in die SPALTEN-Systematik, vgl. Albers 2005

⁶⁵¹ In der Konstruktionspraxis findet diese Empfehlung voraussichtlich vorwiegend Zustimmung von Konstrukteuren mit einem Systematik-orientierten Handlungsmuster; vgl. Wiedner 2013 S.139

⁶⁵² vgl. Kapitel 2.1.2

⁶⁵³ vgl. Albers 2014a S.156

Produktgestalt weiterzuentwickeln – unter der notwendigen Voraussetzung, dass das bestehende Lösungsprinzip grundsätzlich dazu geeignet ist, die gewünschten Funktionseigenschaften zu realisieren.

Nachdem Gestaltungsideen zur Änderung von Gestalt- oder Prozessparametern benannt wurden, sollten sie virtuell, physisch oder virtuell-physisch-gemisch erprobt werden. Hierzu können Methoden zur Eigenschaftsanalyse verwendet werden (→ Kapitel 2.5.4). Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen zurück in die Modellbildung der qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse. Dadurch werden iterativ detaillierte Erkenntnisse über den Zusammenhang von Funktion und Gestalt bekannt, die – eine geeignete Dokumentation vorausgesetzt – bei zukünftigen Entwicklungsprojekten als Ausgangspunkt für eine Funktionsanalyse genutzt werden können.

5.1.6 Zwischenfazit

Die vorgeschlagene Vorgehenssystematik basiert auf Erkenntnissen über methodische Herausforderungen und erfolgreiche Handlungsstrategien, die in den begleiteten Entwicklungsprojekten gesammelt wurden.⁶⁵⁴ Sie beruht weitgehend auf der kombinierten Anwendung bestehender konstruktionsmethodischer Ansätze. Deren Stärke liegt

- entweder in der Beschreibung von Funktionen und Wirkstrukturen⁶⁵⁵
- oder von Eigenschaften der Produktgestalt und des Produktverhaltens⁶⁵⁶

technischer Systeme. Hinzu kommt, dass der Anwendungsbereich der bestehenden Konstruktionsmethoden mit einer qualitativen Funktionsanalyse und der Bildung von Hypothesen über Wirkzusammenhänge endet. Eine quantitative Modellierung multivariater Wirkzusammenhänge wird bislang nicht unterstützt.⁶⁵⁷

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird dagegen ein integrierter Ansatz angestrebt, mit dem sowohl die Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften der Wirk-Struktur, als auch die resultierenden Funktionen und Funktionseigenschaften qualitativ und quantitativ beschrieben werden können.⁶⁵⁸ Folglich bedarf es einer Erweiterung der bestehenden Methoden um solche Modellierungstechniken, mit denen diese Eigenschaften in die Beschreibung des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt miteinbezogen werden können. In Kapitel 5.3 werden zu diesem Zweck drei Modellierungstechniken vorgestellt, die eine quantitative Funktionsanalyse und

⁶⁵⁴ siehe Kapitel 4

⁶⁵⁵ z. B. durch den *Contact and Channel-Approach* nach Albers 2014a und Matthiesen 2002

⁶⁵⁶ z. B. durch ein *Characteristics Properties Model* nach Weber 2000 oder Köhler 2009

⁶⁵⁷ vgl. Abbildung 4.7

⁶⁵⁸ vgl. Kapitel 2.4.1

eine deduktive Synthese von Gestaltungsideen ermöglichen: Die *Einflusspfadanalyse*, die *Cluster-Trend-Analyse* und die *Einflussmatrixanalyse*.

In Abbildung 5.3 wird entsprechend den vorangegangenen Erläuterungen die in vorgeschlagene Vorgehenssystematik um qualitative und quantitative Modellierungstechniken sowie um empirische Analyseverfahren ergänzt. Die

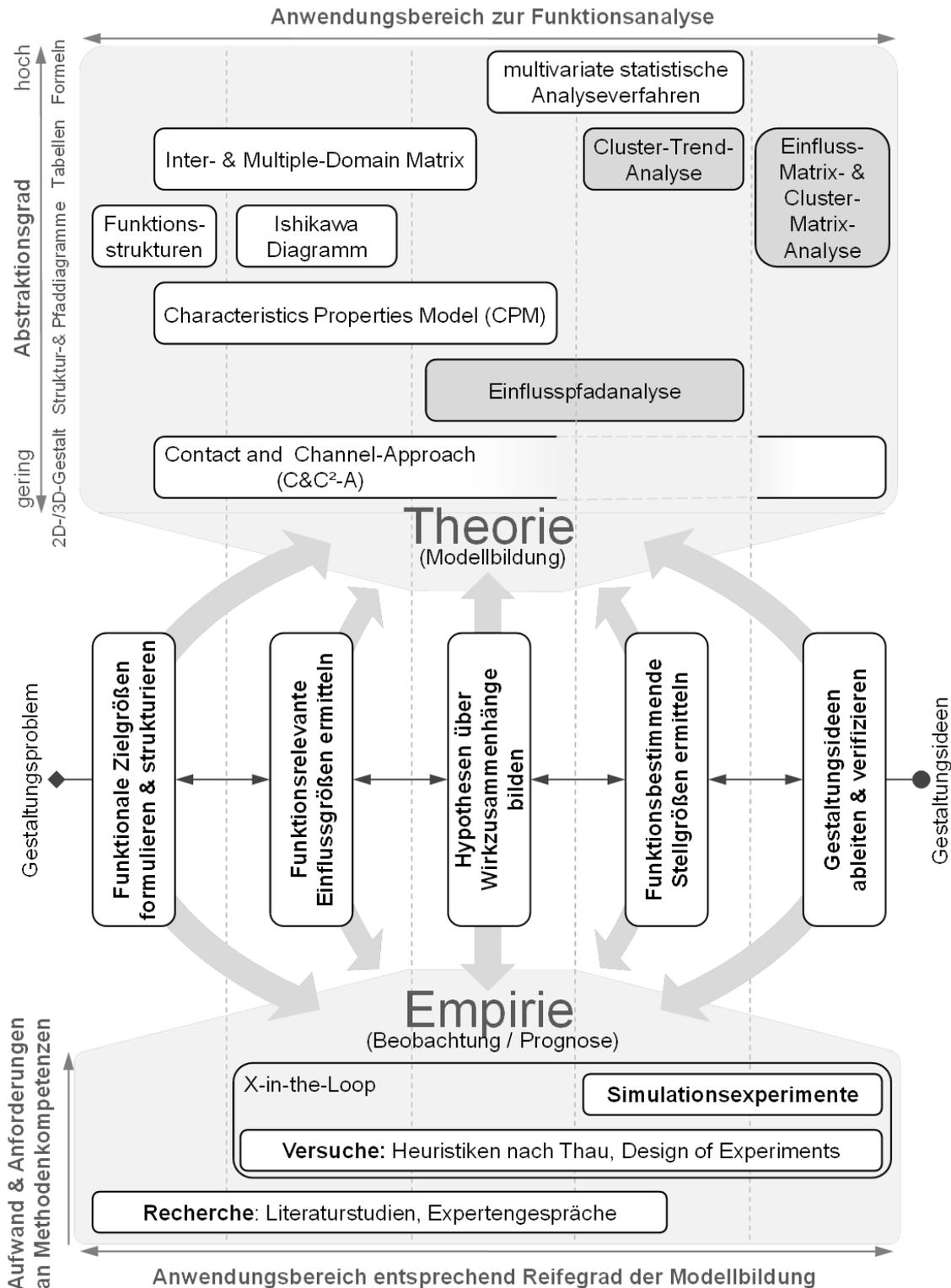


Abbildung 5.3: Theoretische und empirische Ansätze und Modellierungstechniken für eine qualitative und quantitative Funktionsanalyse sowie eine deduktive Synthese von Gestaltungsideen

einzelnen Methoden und Modellierungstechniken werden in den nachfolgenden Teilkapiteln detailliert beschrieben.

In Anhang 1 ist ein Leitfaden zur Auswahl von Methoden und Modellierungstechniken beschrieben, der die individuellen Charakteristika von Entwicklungsprojekten berücksichtigt, die in den vorangegangenen Teilkapiteln diskutiert wurden.

5.2 Qualitative Modellierung funktionsrelevanter Ziel- und Einflussgrößen

Die qualitative Modellierung funktionaler Ziel- und Einflussgrößen sowie deren Relationen ist in den meisten Fällen⁶⁵⁹ eine notwendige Voraussetzung für eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen. Im Folgenden werden Modellierungstechniken vorgestellt, die im Rahmen einer qualitativen Funktionsanalyse einen Beitrag zur Vertiefung des konstruktionsrelevanten Systemverständnisses leisten können. Um einen Überblick zu geben, werden sie jeweils in Profilbeschreibungen zusammengefasst. Eine vertiefte Erläuterung kann jeweils der angegebenen Literatur entnommen werden.

5.2.1 Funktionsstrukturen zur Verknüpfung funktionaler Zielgrößen

Funktionsstrukturen können zu einer zeitlichen und hierarchischen Dekomposition von funktionalen Zielgrößen und Randbedingungen verwendet werden, die im Fokus eines Konstruktionsprojekts stehen. Sie unterstützen Konstrukteure in der Strukturierung des Zielsystems eines Gestaltungsproblems, indem abstrakte funktionale Zielgrößen in konkretere, mess- oder beobachtbare Teilzielgrößen zerlegt und mit Randbedingungen verknüpft werden. Neben der Unterscheidung von Hauptfunktionen und Teilfunktionen ist es auch möglich, Funktionseigenschaften in die Funktionsbeschreibung zu integrieren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass wichtige Funktionseigenschaften möglicherweise nicht explizit als Anforderungen gegeben sind, sondern nur implizit vorliegen und erst erarbeitet werden müssen.

Zur Modellierung von Funktionsstrukturen eignen sich sowohl Pfad- und Strukturdiagramme als auch Tabellen und Matrizen. Erstere eignen sich besser zur grafischen Visualisierung der Relationen zwischen einzelnen Zielgrößen, letztere ermöglichen Bewertungen oder einfache mathematische Verfahren, um z. B. Abhängigkeiten zwischen Zielgrößen zu beschreiben. Abbildung 5.4 zeigt exemplarisch eine grafische Funktionsstruktur aus Fallstudie I.⁶⁶⁰

⁶⁵⁹ sofern nicht umfangreiche Versuche und strukturentdeckenden Verfahren genutzt werden können

⁶⁶⁰ vgl. Tian 2011 (betreute Abschlussarbeit)

Die Entwicklung einer Funktionsstruktur kann durch Beobachtung des Referenzprodukts in der Anwendung und mithilfe von Dokumentationen aus dessen Entwicklungsprozess erfolgen (z. B. FMEAs, Produktdatenblätter, Prüfprotokolle, etc.). Sofern bestimmte funktionale Zielgrößen für das Entwicklungsprojekt bereits vorgegeben sind, können mithilfe dieser Dokumentationen sekundäre Funktionen und Funktionseigenschaften ermittelt werden, die mit den Zielgrößen in Beziehung stehen und die bei einer Änderung der Gestalt- und Prozessparameter des Referenzprodukts nicht negativ beeinflusst werden dürfen. Sofern zu Projektbeginn

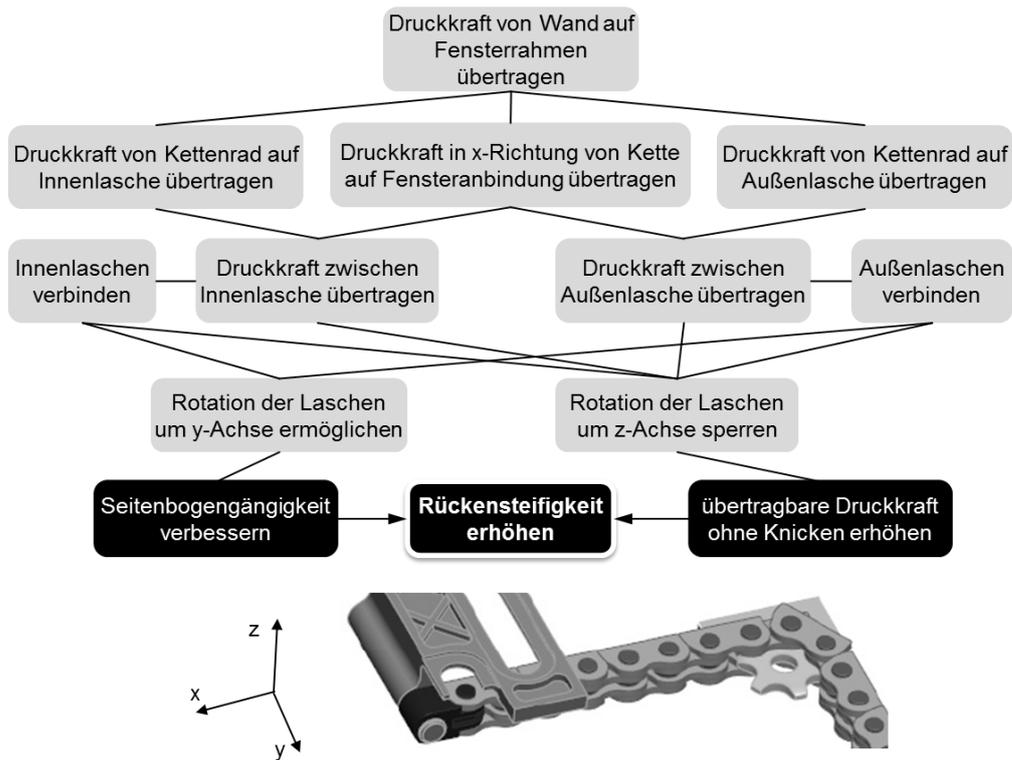


Abbildung 5.4: Hierarchische Funktionsstruktur zur Verknüpfung und Priorisierung geforderter Funktionen (grau) und Funktionseigenschaften (schwarz) der rückensteifen Antriebskette aus Fallstudie I ⁶⁶⁰

noch keine funktionalen Zielgrößen zur Verbesserung vorgegeben bzw. priorisiert sind, können zeitlich strukturierte Funktionsdiagramme dazu eingesetzt werden, eine Übersicht über den Verlauf und die Zustände der Funktionserfüllung für ausgewählte Anwendungsfälle zu entwickeln. Auf dieser Grundlage kann das Vorgehen zur Funktionsanalyse im weiteren Projektverlauf geplant und eine Fokussierung auf bestimmte Zielgrößen vorbereitet werden.

5.2.2 Ursache-Wirkung-Diagramme zur Ermittlung von Einflussgrößen

Ursache-Wirkung-Diagramme unterstützen eine qualitative Funktionsanalyse, indem funktionsrelevante Einflussgrößen aus unterschiedlichen Kategorien diskursiv ermittelt und deren Beziehungen zu einer ausgewählten Zielgröße visualisiert

werden. Auf der Grundlage eines solchen Diagramms können Annahmen darüber formuliert werden, welche Gestalt- und Prozessparameter einen Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung haben.

Die Kategorien zur Suche nach Einflussgrößen können je nach Problemstellung frei gewählt werden. Während in der Literatur häufig die Bereiche *Mensch, Maschine, Material, Methode* und *Milieu* vorgeschlagen werden,⁶⁶¹ haben sich in den untersuchten Fallstudien je nach Gestaltungsproblem auch die Kategorien *Anwendungsfall, Wirkprinzip* bzw. *Wirk-Struktur* und *Funktionsablauf* bewährt. Alternativ können auch erst Einflussgrößen gesammelt und daraus sinnvolle Kategorien abgeleitet werden, wenn zu Beginn der Modellbildung noch kein ausgeprägtes Systemverständnis vorliegt.

Innerhalb dieser Kategorien können Einflussgrößen ermittelt werden, indem die Ursachen für eine beobachtete Funktion oder Funktionseigenschaft eines Referenzprodukts mehrfach wiederholt mit „warum?“ hinterfragt werden. Dieses Hinterfragen verhindert eine oberflächliche Problemanalyse, zeigt Wissenslücken auf und vertieft das qualitative Systemverständnis der Anwender.

Abbildung 5.5 zeigt exemplarisch ein Ursache-Wirkung-Diagramm, in dem die als funktionsrelevant eingestuftten Gestalt- und Prozessparameter für die gewünschte Zielgröße „Einschraubzeit einer Blechbohrschraube“ dargestellt sind.⁶⁶² Die genannten Einflussgrößen wurden jeweils weiter detailliert, um Einflussgrößen auf der Ebene von Zustands-, Gestalt und Wirkungseigenschaften sowie

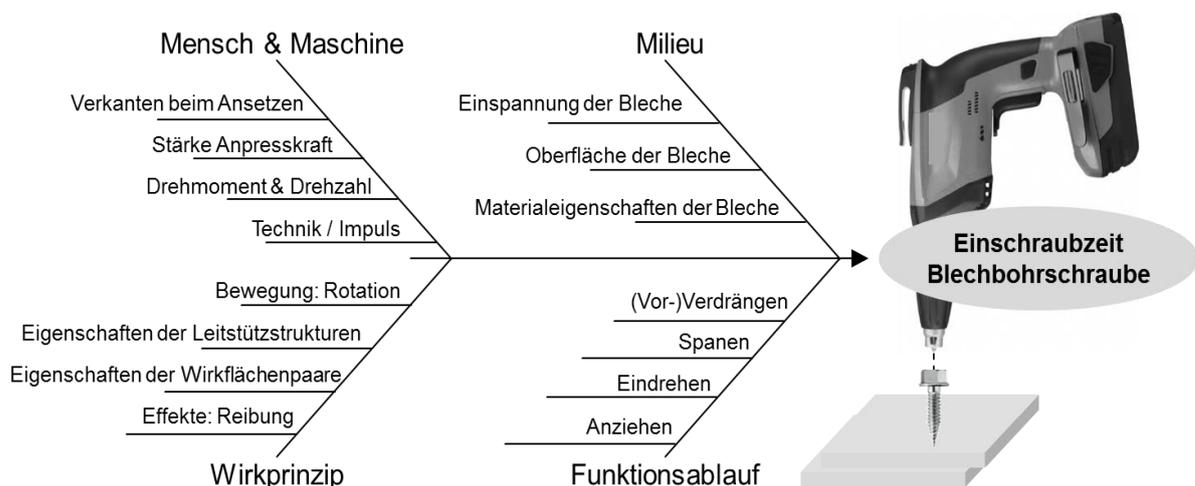


Abbildung 5.5: Oberste Abstraktionsebene eines Ursache-Wirkung-Diagramms zur Ermittlung von Einflussgrößen auf die Einschraubzeit einer Blechbohrschraube (Daten aus Fallstudie III)⁶⁶²

⁶⁶¹ vgl. Kern 2009

⁶⁶² vgl. Stürtzel 2012 (betreute Abschlussarbeit)

Wirkbewegungen zu ermitteln. Hierzu wurden einerseits Expertengespräche, Literaturrecherchen, Versuche und Simulationen und andererseits weitere Modellierungstechniken herangezogen, z. B. ein Contact and Channel Modell (→ Kapitel 5.2.3) und die von THAU beschriebenen Heuristiken zur Modellbildung.⁶⁶³

5.2.3 Contact and Channel Modelle zur Verknüpfung von Funktion und Gestalt

In Contact and Channel Modellen⁶⁶⁴ werden Funktionen mit den funktionsrelevanten Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen des untersuchten Referenzsystems in einen qualitativen Zusammenhang gebracht. Die grafisch-tabellarische Notationsform der Modelle unterstützt

- eine unmittelbar gestaltbezogene Ermittlung der funktionsrelevanten Wirkorte, Wirkbewegungen und Wirkprinzipien (→ Kapitel 2.3.3), sowie
- eine strukturierte Dokumentation von Anforderungen an die Funktionserfüllung (z. B. Aufnahme von Kräften, Begrenzung von Bewegungsräumen etc.).

Die Bestimmung der funktionsrelevanten Wirk-Struktur der Produktgestalt stellt das primäre Ziel der Modellbildung dar. Sie erfolgt nach dem Prinzip, zunächst die Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen im Gestaltungsbereich zu ermitteln und sie in einer grafischen Darstellung der Produktgestalt zu kennzeichnen.

Anschließend sollte das funktionsbestimmende Verhalten und die Eigenschaften der Umgebungs-Systeme in Connectoren erfasst werden. Hierzu müssen die Umgebungs-Systeme, die außerhalb der Grenze des Betrachtungsbereichs liegen, analysiert werden. Erste Hinweise darauf, welche Umgebungs-Systeme relevant sind, geben die Wirkflächenpaare an den Grenzen des Betrachtungsbereichs der C&C²-Modelle. Hier bilden die modellierten Funktionseinheiten physische Schnittstellen zu den interessierenden Umgebungs-Systemen, durch die eine Funktionserfüllung erst möglich wird.

Abschließend sollten die in den vorangegangenen Schritten ermittelten Wirkorte mit den korrespondierenden Funktionen verknüpft werden, die z. B. mithilfe von Funktionsstrukturen und Ablaufdiagrammen (siehe Kapitel 5.2.1) erstellt wurden.⁶⁶⁵ Sofern Wirkflächenpaare ermittelt wurde, für die ad hoc keine Funktionen bekannt sind, sollte die Auswahl der betrachteten Anwendungsfälle hinterfragt und ggf. erweitert werden. Die gesuchten Funktionen können dann durch erneute Beobachtungen ermittelt werden.⁶⁶⁶

⁶⁶³ vgl. Thau 2013 S.103ff.

⁶⁶⁴ vgl. Albers 2014a

⁶⁶⁵ vgl. Kapitel 2.3.3

⁶⁶⁶ Hilfestellungen gibt THAU in seinen *Heuristiken zur Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen*; ergänzende Hinweise liefern die *Heuristiken zur Modellbildung*. Vgl. Thau 2013 S.125ff.

Die zur Modellbildung benötigten Informationen werden sowohl diskursiv als auch recherchierend erhoben oder in Versuchen und Simulationsexperimenten beobachtet bzw. prognostiziert.⁶⁶⁷ Die Modellbildung mit dem Contact and Channel Approach (C&C²-A) stellt damit den erkenntnistheoretischen Kern einer Reihe von Analyseaktivitäten dar, die mehrere verschiedene Methoden zur Funktionsanalyse umfassen können.⁶⁶⁸ Abbildung 5.6 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus einem Contact and Channel Model, das in Fallstudie I⁶⁶⁹ zur Verknüpfung der interessierenden Funktionen⁶⁷⁰ mit den Wirkorten des Referenzsystems genutzt wurde.

In den Fallstudien formulierten die begleiteten Konstrukteure Funktionen nur als Mittel zum Zweck, um die Zielgrößen der Entwicklungsprojekte⁶⁷¹ zu konkretisieren und um die funktionsrelevanten Wirkorte der Produktgestalt zu bestimmen. Diese Wirkorte stellten jedoch nicht das Ergebnis der Funktionsanalyse dar, sondern bildeten lediglich einen Zwischenschritt auf dem Weg zur Bestimmung der funktionsrelevanten *Eigenschaften* der Produktgestalt. Nach ALBERS und MATTHIESEN werden diese Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften der Produktgestalt implizit zu Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zusammengefasst, um sie (in abstrahierter Form) mit den Funktionen des Referenzprodukts zu verknüpfen.⁶⁷²

Diese Verknüpfung von Eigenschaften der Produktgestalt mit den Funktionen bzw. dem Verhalten eines technischen Systems findet üblicherweise nicht explizit in Contact and Channel Modellen statt, sondern lediglich in begleitenden Diskussionen oder separaten schriftlichen Erklärungen.⁶⁷³ Der Grund dafür liegt nach Einschätzung des Autors nicht in der – durchaus geeigneten – Form der Modellbildung, sondern in der Tatsache, dass durch bisherige Forschungsarbeiten⁶⁷⁴ keine Vorlagen dafür erstellt wurden.

⁶⁶⁷ vgl. Thau 2013 S.103ff.

⁶⁶⁸ In den begleiteten Entwicklungsprojekten wurde beobachtet, dass die Anwender des Contact and Channel-Approach zum Teil den Anspruch erhoben, allein mit einer theoretischen Modellbildung ein vertieftes Systemverständnis über die Funktionsweise der Referenzprodukte zu erreichen. Kritik wurde daran geäußert, dass die explizite Bildung des Modells lediglich die bereits implizit bekannten (jedoch fragmentiert dokumentierten) Informationen aus Befragungen, Beobachtungen und Simulationen wiedergaben. Nach ALBERS und MATTHIESEN ist diese zentrale Zusammenfassung der Erkenntnisse das erklärte Ziel der Entwicklung von C&C²-Modellen. Dadurch können Wissenslücken aufgezeigt und weiterführende Analyseaktivitäten auf die funktionsbestimmenden Wirkorte fokussiert werden. Siehe auch Kapitel 2.3.2 und 2.3.3

⁶⁶⁹ vgl. Tian 2011 S.50 (betreute Abschlussarbeit)

⁶⁷⁰ siehe Abbildung 5.4

⁶⁷¹ siehe Kapitel 4.1.2

⁶⁷² In Grundhypothese II des Contact and Channel-Approach heißt es: „*Funktionsbestimmend sind die Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare, der Leitstützstrukturen und der Connectoren*“; vgl. Albers 2014a

⁶⁷³ vgl. Matthiesen 2002 S.59ff, Albers 2014a S.165

⁶⁷⁴ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Ohmer 2008, Lemburg 2009, Alink 2010, Enkler 2010, Wiedner 2013, Thau 2013

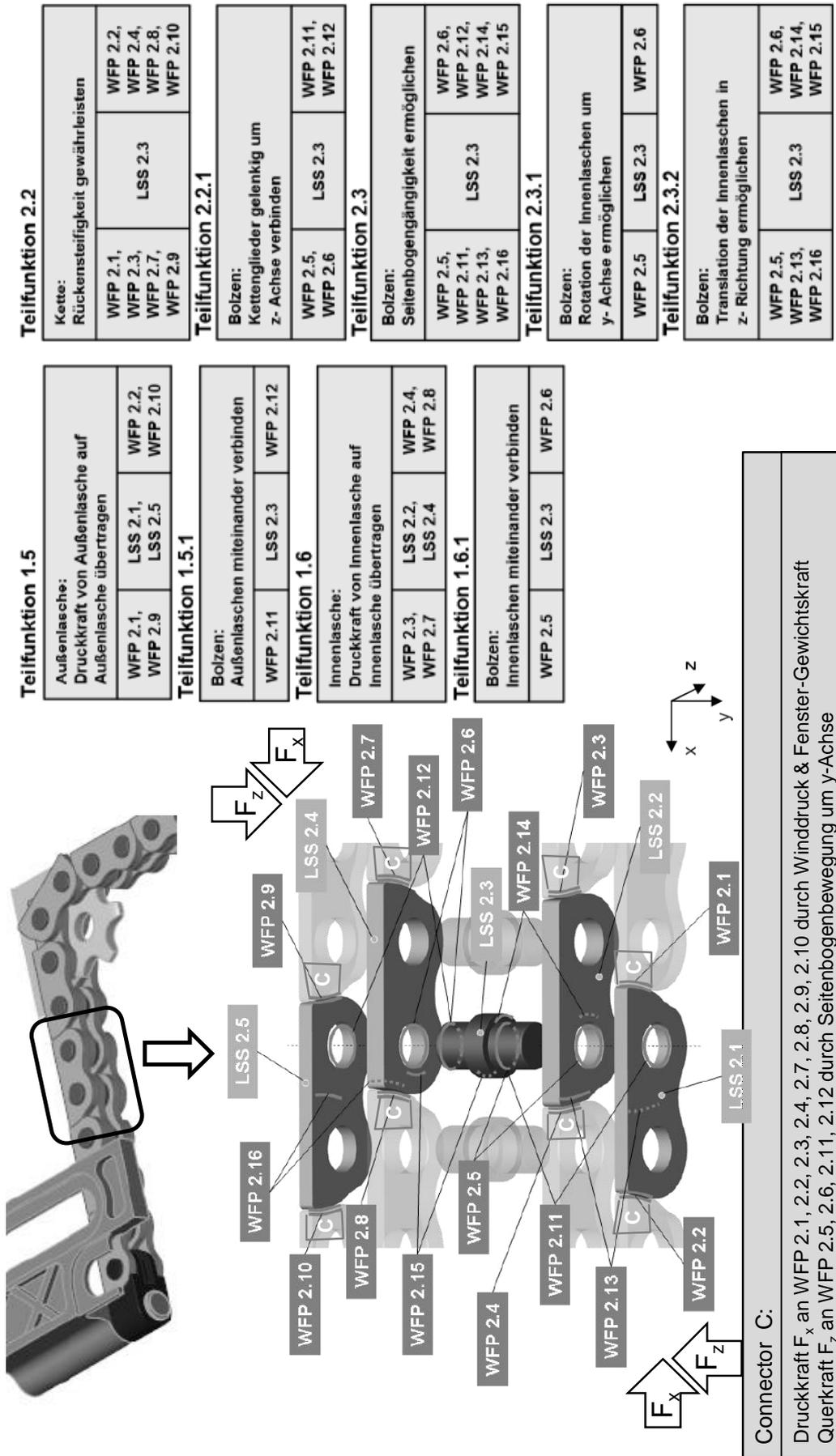


Abbildung 5.6: Verknüpfung von Funktionen mit Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen einer rückensteifen Antriebskette (Fallstudie I)⁶⁶⁹

Im Fokus der ursprünglichen Arbeiten von ALBERS und MATTHIESEN standen mehr die Entwicklung einer „durchgängigen Methodik zum Denken und Handeln“ sowie das „Ziel, als Leitfaden beim Denken zu dienen“. ⁶⁷⁵ Eine wissenschaftliche Untersuchung, welche Formen der Modellbildung dazu geeignet sind, die komplexen Zusammenhänge von Funktion und Gestalt zu explizieren, fand in den daran anschließenden Forschungsarbeiten zum Contact and Channel Approach eher beiläufig statt. ⁶⁷⁶

In den begleiteten Entwicklungsprojekten wurde vorgeschlagen, die etablierte Darstellungsform der Modelle dahingehend zu erweitern, dass in den Tabellen nicht nur Funktionen, sondern auch Funktions- oder Zustandseigenschaften mit Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen verknüpft werden. In Abbildung 5.7 wurden auf diese Weise die Funktionseigenschaften „Rückensteifigkeit“ und „Seitenbogengängigkeit“ in das Modell integriert.

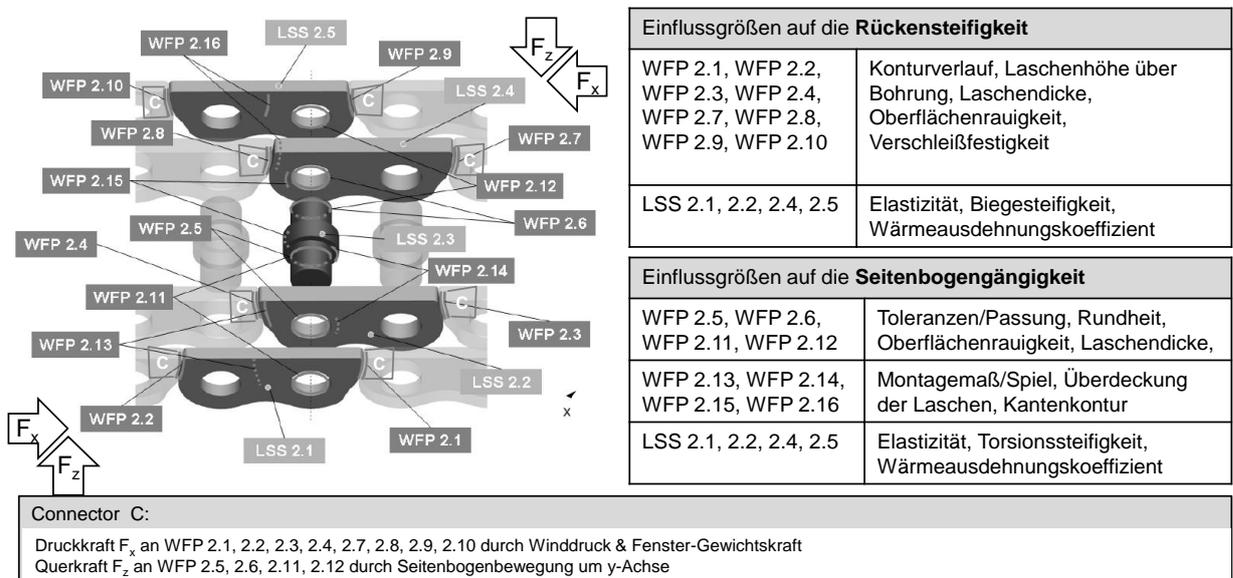


Abbildung 5.7: Qualitative Beschreibung funktionsrelevanter Eigenschaften einer rückensteifen Antriebskette (Daten aus Fallstudie I) ⁶⁷⁷

5.2.4 CPM-Modell zur Visualisierung von Eigenschaftsbeziehungen

In einem Characteristics-Properties Model (CPM) werden nach WEBER funktionsbestimmende Produkteigenschaften in einem Pfaddiagramm miteinander

⁶⁷⁵ Matthiesen 2002 S.1f.

⁶⁷⁶ ALBERS und ALINK führten beispielsweise erst im Jahr 2009 eine tabellarische Schreibweise für Funktionen ein, um sie mit Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zu verknüpfen. Vgl. Albers 2009b

⁶⁷⁷ vgl. Tian 2011 S.57ff. (betreute Abschlussarbeit)

verknüpft.⁶⁷⁸ Die erforderlichen Informationen können z. B. durch Schätzen, Erfahrungswerte, Befragung von Experten, experimentelle Bestimmung, Berechnungen oder auch durch Auswertung vorhandener Dokumentationen und initial gegebenen Anforderungslisten ermittelt werden.⁶⁷⁹

Im Gegensatz zu den in vorangegangenen Teilkapiteln vorgestellten Methoden beabsichtigt WEBER mit dem CPM nicht die Entwicklung einer Modellierungstechnik, die als Mittel zum Lösen von Gestaltungsproblemen eingesetzt werden kann. Vielmehr verfolgt er das Ziel, ein Bewusstsein für die Bedeutung von gestalt- und verhaltensbeschreibenden Eigenschaften zu schaffen und sie „in das Zentrum der Betrachtungen zu rücken.“⁶⁸⁰ Die vorgeschlagene Modellierungstechnik (Pfaddiagramme⁶⁸¹) sollte demnach nur für gering komplexe Systeme für eine Funktionsanalyse genutzt werden, da mit der grafischen Darstellung nur eine eingeschränkte Anzahl an Wirkzusammenhängen übersichtlich visualisiert werden kann.⁶⁸²

Abbildung 5.8 illustriert diese Problematik anhand des im vorangegangenen Teilkapitel vorgestellten Modells einer rückensteifen Antriebskette. Darin werden die Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen (grau) mit den funktionsrelevanten Gestalteigenschaften (schwarz) und den Funktionseigenschaften (weiß) verknüpft. Die Relationen zwischen diesen Elementen,⁶⁸³ die in CPM-Modellen z. B. mit mathematischen Gleichungen hinterlegt werden,⁶⁸⁴ sind bei einer qualitativen Funktionsanalyse noch weitgehend unbekannt. Sie können durch Versuche empirisch ermittelt werden.

Als alternative Darstellungsform, die zur Analyse von Einflussbeziehungen zwischen Produkteigenschaften besser geeignet sei, schlagen WEBER und KÖHLER eine Matrixnotation vor.⁶⁸⁶ Mit dieser Notationsform lässt sich

- *zeilenweise* kennzeichnen, welche Funktionen und Funktionseigenschaften von der jeweiligen Wirkungs-, Gestalt- oder Zustandseigenschaft beeinflusst werden, sowie
- *spaltenweise* ablesen, welche Gestalteigenschaften in einem Zusammenhang mit der betrachteten Funktion oder Funktionseigenschaft stehen.

⁶⁷⁸ vgl. Weber 2000, Weber 2014; siehe Abbildung 2.14 in Kapitel 2.4.3

⁶⁷⁹ vgl. Weber 2012 S.11f., S.14

⁶⁸⁰ Weber 2012 S.8

⁶⁸¹ vgl. Abbildung 2.14 (rechts) in Kapitel 2.4.3

⁶⁸² vgl. Köhler (und Weber) 2008 S.169

⁶⁸³ z. B. „welcher Wirkzusammenhang besteht zwischen der Kantenkontur und der Rückensteifigkeit?“

⁶⁸⁴ vgl. Köhler 2008 S.170

⁶⁸⁵ vgl. Tian 2011 S.57ff. (betreute Abschlussarbeit)

⁶⁸⁶ vgl. Weber 2000; Köhler 2009 S.108

Abbildung 2.14 in Kapitel 2.4.3 zeigt exemplarisch sowohl ein Pfaddiagramm als auch eine Matrixnotation eines solchen CPM-Produktmodells. Sie können je nach Zweck der Modellbildung ineinander überführt und miteinander kombiniert werden.

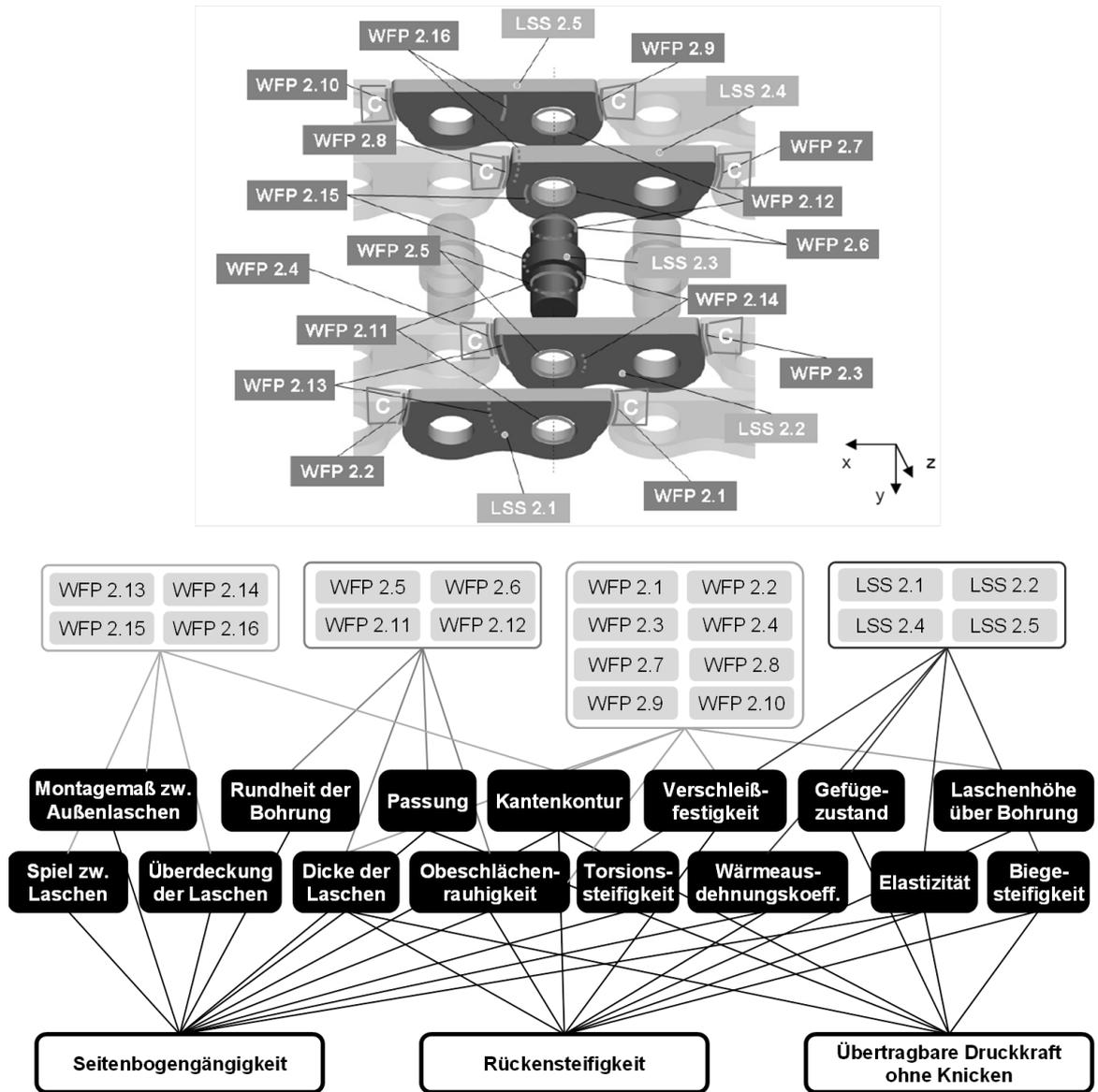


Abbildung 5.8: Verknüpfung der Gestalteigenschaften von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen mit Funktionseigenschaften einer rückensteifen Antriebskette (Fallstudie I)⁶⁸⁵

In den begleiteten Fallstudien I, V, VI und VIII wurde die von WEBER vorgeschlagene Modellierungstechnik aus zweierlei Gründen angewendet: Zum einen regte sie dazu an, die Gestalt- und Zustandseigenschaften der bereits als funktionsrelevant eingestufteten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zu ermitteln. Andererseits unterstützten die Modelle eine grafische Darstellung der Relationen zwischen diesen Eigenschaften und den funktionalen Zielgrößen. Dadurch wurde eine Fokussierung auf einzelne Wirkzusammenhänge für das weitere Vorgehen unterstützt, z. B. auf

solche, die bislang nicht ausreichend (quantitativ) verstanden und daher z. B. in Versuchen vertieft analysiert werden sollten.

5.2.5 Zwischenfazit

Die Anwendung der vorgenannten Modellierungstechniken ist vorwiegend dann angebracht, wenn

- ein gemeinsames, qualitatives Systemverständnis erarbeitet und
- eine Übersicht über die funktionsrelevanten Einflussgrößen erstellt werden soll, die in einem (vermuteten) Zusammenhang stehen zu den funktionalen Zielgrößen, die durch konstruktive Maßnahmen verbessert werden sollen.

Durch die Anwendungsgrenzen der einzelnen Methoden ist zur qualitativen Funktionsanalyse häufig eine Kombination verschiedener Modellierungstechniken erforderlich. Während beispielsweise *Funktionsstrukturen* lediglich eine zeitliche und hierarchische Dekomposition von Funktionen ermöglichen, können mithilfe von *Ursache-Wirkung-Diagrammen* die zu einer funktionalen Zielgröße zugehörigen Einflussgrößen aus unterschiedlichen Dimensionen ermittelt werden. *Contact and Channel-Modelle*⁶⁸⁷ wiederum sind auf eine Beschreibung der funktionsrelevanten Wirk-Struktur spezialisiert. Mithilfe eines *Characteristics-Properties Model*⁶⁸⁸ können ergänzend dazu die Eigenschaften der Wirk-Struktur beschrieben werden, aus denen sich ihre Gestalt und ihre Funktionen ergeben.

Da die genannten Methoden vorwiegend auf grafischen Darstellungen beruhen, wird eine Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Funktion und Gestalt besonders gut unterstützt. Wenn bei einer Funktionsanalyse jedoch eine größere Anzahl von Einflussgrößen und komplex vernetzte Zusammenhänge untersucht werden soll, ist eine Auswertung der Modelle (auch bei moderat komplexen Referenzsystemen⁶⁸⁹) oft nur stark eingeschränkt möglich.

Abhilfe schafft in diesem Fall die Konvertierung der Modelle in eine Matrixschreibweise, mit der auch komplexe multivariate Wirkzusammenhänge übersichtlich abgebildet werden können. Außerdem eröffnet sich dadurch die Möglichkeit, die qualitativen und quantitativen Analyseverfahren des *Structural Complexity Management*⁶⁹⁰ anzuwenden. Eine vertiefte Erläuterung solcher quantitativer Analyse- und Modellierungstechniken wird in Kapitel 5.3 vorgestellt.

⁶⁸⁷ vgl. Albers 2014a

⁶⁸⁸ vgl. Weber 2000, Weber 2014

⁶⁸⁹ Dazu werden z. B. die rückensteife Antriebskette aus Fallstudie I, die Blechbohrschraube aus Fallstudie III oder auch der Prüfprozess des Druckbegrenzungsventils aus Fallstudie V gezählt.

⁶⁹⁰ vgl. Lindemann 2009

5.3 Quantifizierte Modellierung und Analyse von Wirkzusammenhängen

Bei einer quantitativen Funktionsanalyse wird das Ziel verfolgt, funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter durch eine systematische „Variation der Gestalt“ zu bestimmen. In den Kapiteln 2.5.3 und 4.3.2 wurde gezeigt, dass zu diesem Zweck zunächst geprüft werden sollte, ob eine Möglichkeit zur Anwendung des Design of Experiments (DoE) und der multivariaten statistischen Analysemethoden besteht. Ebenso wurde jedoch gezeigt, dass diese Möglichkeit in Entwicklungsprojekten nicht immer gegeben ist und dass daraus ein Bedarf entsteht für eine durchgängige, qualitative und quantitative Funktionsanalyse mithilfe von Entwicklungsmethoden.

Im vorliegenden Teilkapitel werden mehrere Modellierungstechniken vorgestellt, die diesen Bedarf bedienen sollen:

- Eine *Einflusspfadanalyse* (EPA) ist geeignet, um auf Erfahrungswissen basierend einzelne Wirkzusammenhänge grafisch zu beschreiben und die Einflussstärke einzelner Gestalt- und Prozessparameter quantitativ zu bewerten.
- Eine *Cluster-Trend-Analyse* (CTA) ermöglicht eine (explorative) Ermittlung einzelner Wirkzusammenhänge aus unterschiedlich skalierten oder stark streuenden Messdaten, die in Versuchen erhoben wurden.
- Eine *Einflussmatrix- bzw. Cluster-Matrix-Analyse* eignet sich zur Bestimmung der Einflussstärke von solchen Gestalt- und Prozessparametern, die als Stellgrößen für mehrere Funktionen oder Funktionseigenschaften eine besondere Bedeutung haben.

In Abgrenzung zu statistischen Verfahren sind diese Modellierungstechniken für jene Anwendungsfälle vorgesehen, in denen entweder

- Versuche zur Datenerhebung nicht durchgeführt werden können (→ EPA),
- die nötige Statistik-Methodenkompetenz nicht verfügbar ist (→ EPA, CTA)
- Einflussgrößen nicht isoliert voneinander variiert werden können (→ CTA),
- eine exakte Quantifizierung der Einflussgrößen nicht nötig ist (→ EPA, CTA),
- stark streuende Einflussgrößen den Einsatz statistischer Verfahren erschweren (→ CTA).

In den nachfolgenden Teilkapiteln werden die einzelnen Modellierungstechniken vorgestellt. Dabei wird auch darauf eingegangen, wie sie miteinander kombiniert werden können, um im Vergleich der einzelnen Wirkzusammenhänge diejenigen Gestalt- und Prozessparameter mit dem größten Einfluss auf die Funktionserfüllung zu bestimmen. In Anhang 1 ist ein Leitfaden dargestellt, der Systemkonstrukteure bei der Auswahl der Methoden und Modellierungstechniken unterstützen soll, die in den

nachfolgenden Teilkapiteln beschrieben sind. Er berücksichtigt die individuellen Charakteristika von Entwicklungsprojekten.

5.3.1 Einflusspfadanalyse

Die Einflusspfadanalyse ist ein Verfahren zur Bestimmung der Einflussstärke funktionsrelevanter Gestalt- und Prozessparameter, das auf einer grafischen Auswertung von diskursiv ermittelten Einschätzungen und Erfahrungswerten beruht. Sie setzt sich aus zwei Schritten zusammen: Der *qualitativen* Modellbildung eines Pfaddiagramms und der *Quantifizierung* der Relationen des Modells mithilfe einfacher mathematischer Verfahren. Das Vorgehen dazu wird nachfolgend anhand von Beispielen beschrieben.

Teil 1: Qualitative Modellbildung

Ein Pfaddiagramm ist eine grafische Darstellung, in der Annahmen und Erkenntnissen über kausale Einflussbeziehungen zwischen einzelnen

- *Zielgrößen*: Funktionen und Funktionseigenschaften und
- *Einflussgrößen*: Gestalt- und Prozessparameter, insbesondere die Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften von Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen

zusammengefasst und visuell aufbereitet werden. Dazu werden alle relevanten Einfluss- und Zielgrößen, bei denen ein kausaler Zusammenhang vermutet wird, aufgezeichnet und durch einen Pfeil miteinander verbunden. Ein Pfeil verläuft entsprechend dem vermuteten Ursache-Wirkung-Zusammenhang, z. B. von einer Gestalt- (G) zu einer Funktionseigenschaft (F). Die damit getroffene Aussage lautet:

„Wenn sich G ändert,⁶⁹¹ wird sich in dem angenommenen Anwendungsfall auch F ändern.“ Durch diese Verknüpfung können sowohl direkte als auch indirekte Relationen zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen beschrieben und ausgewertet werden.

Abbildung 5.9 zeigt ein Pfaddiagramm aus Fallstudie I, mit dem die Einflussbeziehungen zwischen Gestalt- und Prozessparametern sowie Zustands- und Funktionseigenschaften einer rückensteifen Antriebskette analysiert wurden.⁶⁹² Zur Gliederung des Pfaddiagramms wurde eine Top-Down-Struktur gewählt, bei der die untersuchten Zielgrößen in der obersten Ebene des Diagramms notiert und die relevanten Einflussgrößen in den darunterliegenden Ebenen einsortiert wurden. In

⁶⁹¹ Diese Änderung kann sowohl durch konstruktive Maßnahmen als auch durch fertigungs- oder betriebsbedingte Beanspruchungen hervorgerufen werden.

⁶⁹² vgl. Tian 2011 S.52ff. (betreute Abschlussarbeit)

dem gezeigten Modell wurden die drei Ebenen „I: Funktions- und Zustandseigenschaften“, „II: Anordnung der Wirkorte“ und „III: Gestalt- und Prozessparameter“ gewählt.⁶⁹³

Voraussetzung für die Anwendung einer Einflusspfadanalyse ist ein ausgeprägtes Systemverständnis, das mithilfe der in Kapitel 5.2 beschriebenen Modellierungstechniken erreicht werden kann. Empfohlen wird insbesondere eine vorgelagerte Bestimmung der funktionsrelevanten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen des Referenzsystems (siehe Kapitel 5.2.3).

Davon ausgehend wird abgeschätzt, welche Veränderungen bei einer Variation der Eigenschaften dieser Wirkorte zu erwarten sind (inkrementelle Variation der Gestalt). Dabei werden alle Charakteristika der Wirkprinzipien, d. h.

- die auftretenden physikalischen Effekte,
- die Anordnung und Relativbewegungen der Wirkorte,
- sowie die Gestalt-, Zustands- und Wirkungseigenschaften dieser Wirkorte

hinterfragt. Je nach Abhängigkeitsbeziehung können die Elemente zueinander in Relation gesetzt und in mehreren Ebenen angeordnet werden. Als Orientierungshilfe zur Bildung einer Ebenen-Rangfolge können folgende Empfehlungen dienen:

- Die Einträge der Ebene III „Gestalteigenschaften“ sollte mit jenen der Ebene II „Wirkungen / Wirkprinzipien“ verknüpft werden.
- Ausgehend von Ebene II „Wirkungen / Wirkprinzipien“ können meist direkte Verknüpfungen zu Zustands- und Funktionseigenschaften gezogen werden (Ebene I in Abbildung 5.9), die als funktionale Zielgrößen im Fokus eines Entwicklungsprojekts stehen.
- Sofern Prozessparameter eine Rolle spielen, hat es sich bewährt, diese in Ebene III oder einer separaten Ebene darzustellen.

⁶⁹³ Die mittlere Modellebene II beschreibt jeweils technische Wirkungen / Wirkprinzipien, die für die Erfüllung der funktionalen Zielgrößen in der oberen Modellebene I erfüllt sein müssen.

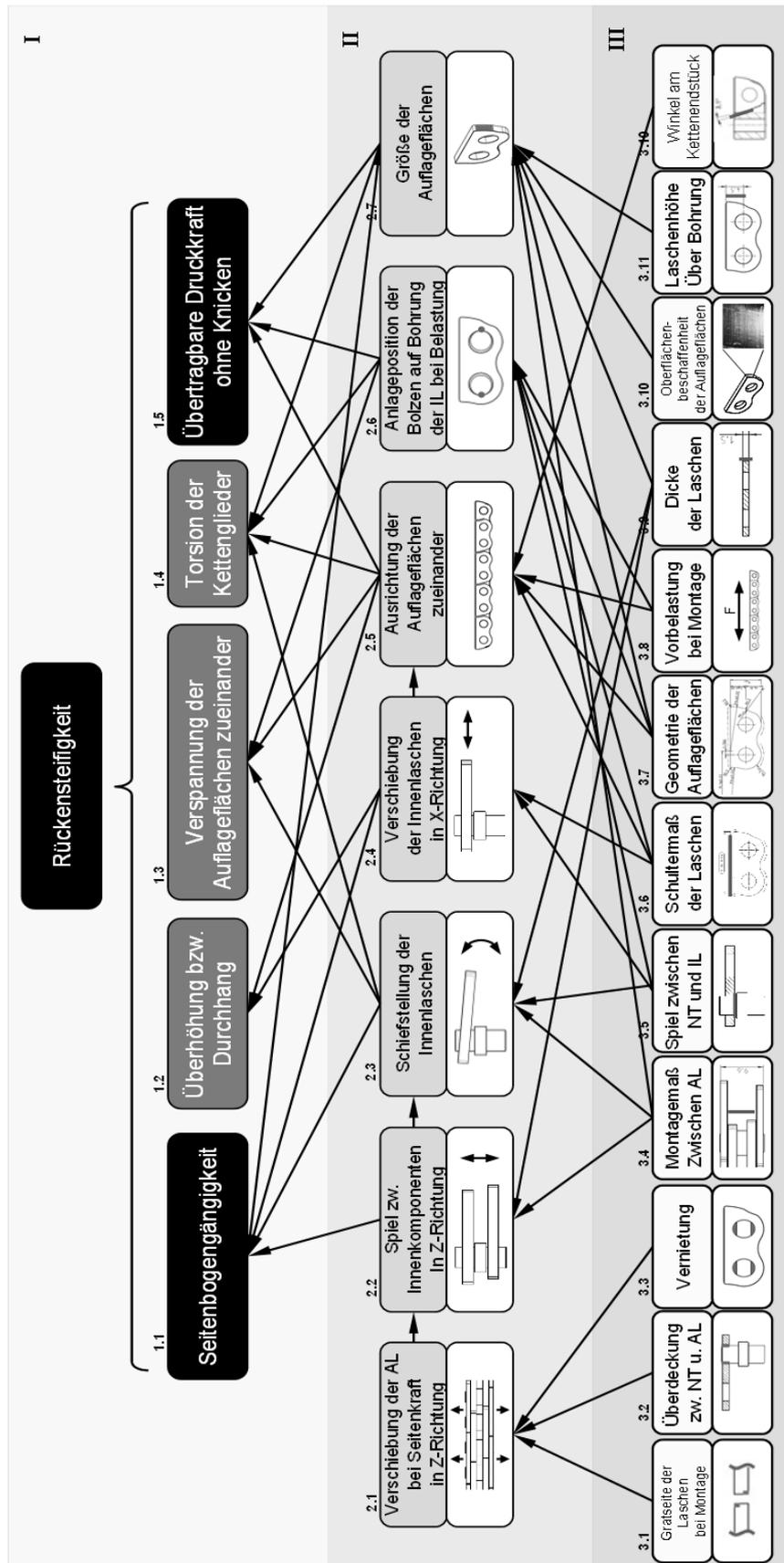


Abbildung 5.9: Einflussbeziehungen zwischen Gestalt- und Prozessparametern (Ebene III), Zustandseigenschaften (Ebene I, grau) und Funktionseigenschaften (Ebene I, schwarz) rückensteifer Antriebsketten⁶⁹⁴

Um einen möglichst konkreten Bezug des Modells zur Produktgestalt beizubehalten, wurden in Abbildung 5.9 einzelne Grafiken zur Veranschaulichung der Produktgestalt in das Pfaddiagramm eingefügt. Sie ermöglichen einen grafischen Verweis auf die Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen des Systems. Die Verwendung mehrerer Farben kann die Unterscheidung einzelner Wirkzusammenhänge zusätzlich unterstützen.

Softwareanwendungen zur statistischen Auswertung der Modelle (z. B. durch eine Regressionsanalyse)⁶⁹⁴ wurden in den Fallstudien nicht angewendet. Der Grund dafür lag in der verfügbaren Datenbasis: In den Fallstudien I, II, IV und VII waren umfangreiche Versuche zur Messdatenerhebung nicht oder nur stark eingeschränkt möglich. Diese Beobachtungsbarriere⁶⁹⁵ machte es erforderlich, alternative, manuelle Auswerteverfahren anzuwenden. Durch diesen Umstand konnten die begleiteten Entwicklungsingenieure nur auf die ihnen bekannten Softwareanwendungen wie parameterbasierte Grafikbearbeitungsprogramme, MS-PowerPoint und MS-Excel zurückgreifen. Da damit eine automatisierte Auswertung der Pfaddiagramme jedoch nicht möglich war, wurde das auf den nachfolgenden Seiten vorgeschlagene, manuelle Auswerteverfahren genutzt.

Teil 2: Quantitative Analyse und Bewertung von Wirkzusammenhängen

Im zweiten Schritt einer Einflusspfadanalyse findet die Auswertung des zuvor erstellten Pfaddiagramms statt, um die Einflussstärke einzelner Wirkzusammenhänge zu bestimmen. Dadurch wird eine Ermittlung von Schlüsselfaktoren angestrebt, die bei inkrementelle Änderungen einen signifikanten Einfluss auf die funktionalen Zielgrößen erwarten lassen.

In der Literatur wird ein Pfaddiagramm beispielsweise zur Bildung eines Strukturgleichungsmodells⁶⁹⁷ eingesetzt, mit dem die im Modell dargestellten, hypothetischen Zusammenhänge überprüft und die Einflussstärken der einzelnen Parameter ermittelt werden. Voraussetzung dafür ist die Möglichkeit, eine umfangreiche Datenbasis auszuwerten. Für den Fall, dass eine Datenerhebung durch Versuche und Simulationsexperimente ohne Einschränkung möglich ist, sollten derartige mathematische Verfahren oder die in den nachfolgenden Kapiteln vorgeschlagenen, weniger komplizierten Modellierungstechniken bevorzugt eingesetzt werden.

⁶⁹⁴ siehe Kapitel 2.5.3

⁶⁹⁵ siehe Kapitel 4.2.2

⁶⁹⁶ vgl. Tian 2011 S.65 (betreute Abschlussarbeit)

⁶⁹⁷ Hierbei handelt es sich um ein mathematisches Mehrgleichungssystem mit mehreren Regressionsgleichungen; vgl. Kapitel 2.5.3. für ein Anwendungsbeispiel aus der Produktentwicklung

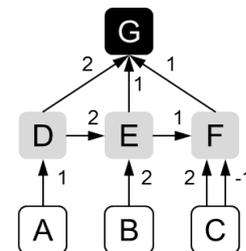
Sofern eine Datenerhebung durch Versuche und Simulationsexperimente jedoch *nicht* möglich ist, müssen alternative Verfahren zur Einflusspfadanalyse eingesetzt werden. Das nachfolgend beschriebene Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Auswertung eines Pfaddiagramms ausschließlich auf theoretischen Überlegungen, Literaturstudien und Erfahrungswissen basierend möglich ist. Die Ergebnisgüte der Einflusspfadanalyse ist dementsprechend abhängig vom Wahrheitsgehalt der Erfahrungswerte und der Literaturdaten, aus denen das Modell erstellt wird. Sie kann durch Einbeziehung gesicherter Erkenntnisse aus Versuchen oder Simulationsexperimenten gesteigert werden.

Die Bestimmung der Einflussstärke einzelner Gestalt- oder Prozessparameter der untersten Modellebene auf die untersuchten Zielgrößen in der oberen Modellebene erfolgt in vier Schritten nach dem auf der folgenden Seite erläuterten Schema.⁶⁹⁸ Die Stärke dieses Verfahrens liegt in einem reduzierten Aufwand gegenüber jenen Methoden, bei denen anhand einer „Vernetzungstabelle“ alle Ziel- und Einflussgrößen daraufhin überprüft werden, welchen Einfluss (keinen, mittlere oder hohe Wirkung) eine Größe auf eine andere Größe hat.⁶⁹⁹ Ebenso besteht bei einer Einflusspfadanalyse nach dem hier vorgestellten Schema die Möglichkeit, indirekte Einflussbeziehungen zu berücksichtigen. Dadurch wird das vernetzte Denken beim Konstruieren gestärkt und die Ergebnisgüte kann gegenüber konventionellen Schätzverfahren gesteigert werden.

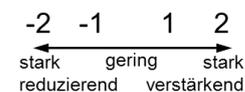
1. Gewichtung einzelner Einflussbeziehungen:

Zunächst wird eine Gewichtung der einzelnen Abschnitte der Pfade zwischen den Einflussgrößen auf der untersten Modell-Ebene und den Zielgrößen auf der obersten Modell-Ebene vorgenommen. Dazu wird für jeden Pfadabschnitt auf einer Skala die Wirkung abgeschätzt, die eine inkrementell veränderte Ausprägung einer Einflussgröße auf das Zielelement hervorrufen würde. Sofern für gegensinnige Änderungen einer Einflussgröße unterschiedliche Einflussstärken vermutet werden, kann eine Einflussbeziehung auch mit zwei Pfeilen und jeweils unterschiedlichen Einflussstärken gekennzeichnet werden.

Beispiel:



Skala:



2. Berechnung der Einzelpfadgewichte:

Ausgehend von einer Einflussgröße auf der untersten Modellebene wird ein Einflusspfad bis zu einer Zielgröße ausgewählt. Jeder Pfeil

- innerhalb einer Ebene (indirekte Relationen aus

Beispiel:

A-D-G:

$$(1 \cdot 1) \cdot (2 \cdot 1) = 2$$

⁶⁹⁸ vgl. Tian 2011 S.67ff. (betreute Abschlussarbeit)

⁶⁹⁹ siehe Abbildung 2.15; in der Literatur sind auch die Begriffe „Einflussmatrix“ und „Korrelationsmatrix“ geläufig; vgl. Gausemeier 2009 S.67f.

Sicht der Zielgröße) wird mit dem Faktor 0,5 in die Bewertung gezählt.

- in eine höhere Ebene (direkte Relation aus Sicht der Zielgröße) wird als Faktor 1 gezählt.

Die Ausprägung der Faktoren kann – bei einheitlicher Anwendung – frei gewählt werden, da es sich um eine lineare Einflussbewertung handelt.

Durch Multiplikation der einzelnen Pfadabschnitte wird anschließend ein Einzelpfadgewicht für eine Einflussgröße und einen Einflusspfad errechnet. Dieser Schritt wird für alle Einflusspfade einer Einflussgröße auf die ausgewählte Zielgröße wiederholt.

A-D-E-G:

$$(1 \cdot 1) \cdot (2 \cdot 0,5) \cdot (1 \cdot 1) = 1$$

A-D-E-F-G:

$$(1 \cdot 1) \cdot (2 \cdot 0,5) \cdot (1 \cdot 0,5) \cdot (1 \cdot 1) = 0,5$$

3. *Bewertung der Gesamtpfadgewichte für einzelne Zielgrößen:*

Aus den zuvor errechneten Einzelpfadgewichten wird für jede Zielgröße durch Addition ein Gesamtpfadgewicht (GPG) ermittelt. Hierbei handelt es sich um eine abstrakte Größe ohne einen konkreten physikalischen Bezug.

Beispiel:

$$GPG_{A \rightarrow G} = 2 + 1 + 0,5 = 3,5$$

$$GPG_{B \rightarrow G} = 2 + 1 = 3$$

$$GPG_{C^+ \rightarrow G} = 2$$

$$GPG_{C^- \rightarrow G} = -1$$

4. *Vergleich der Einflussbeziehungen auf eine Zielgröße:*

Aus den Gesamtpfadgewichten der einzelnen Einflussgrößen auf die ausgewählte Zielgröße können Rückschlüsse auf die relative Stärke eines Wirkzusammenhangs gezogen werden. Dazu werden die einzelnen Gesamtpfadgewichte hinsichtlich ihrer relativen Einflussstärke in einer Tabelle verglichen.

Beispiel:

	A	B	C ₊	C ₋
G	3,5	3	2	-1

Ergebnis: Der größte Effekt auf G wird durch eine inkrementelle Änderung an A erwartet.

Wendet man beispielsweise das oben dargestellte Verfahren zur Bestimmung der Gesamtpfadgewichte der Einflussgrößen auf das in Abbildung 5.9 dargestellte Pfaddiagramm an, ergibt sich jeweils für den Einfluss der Gestalteigenschaft „Schultermaß der Laschen“ (Leitstützstruktur 2.1, 2.2, 2.3, 2.4)

- auf die Funktionseigenschaft „Überhöhung bzw. Durchhang der Kette“:

$$GPG_{Schultermaß \rightarrow \text{Überhöhung}} = 1 + 1 + 0,5 = 2,5$$

- auf die Zustandseigenschaft „Verspannung der Auflageflächen zueinander“:

$$GPG_{Schultermaß \rightarrow \text{Verspannung}} = 0,5 + 1 + 1 = 2,5$$

Die oben berechneten Ergebnisse zeigen an, dass sich bei Variation der Gestalteigenschaft „Schultermaß der Laschen“ voraussichtlich die „Überhöhung der Kette“ und die „Verspannung der Auflageflächen der Laschen zueinander“ in derselben Größenordnung verändern werden. Den Berechnungen liegen jeweils zwei Annahmen zugrunde:

- Zur Einflussrichtung: Dass die Effektstärke einer Variation der Gestalteigenschaft „Schultermaß der Laschen“ betragsmäßig in beide Richtungen (verringern, vergrößern) gleich hoch ist;
- Zur Einflussstärke: Dass für jeden Pfadabschnitt die Einflussstärke „1“ gilt.

Sofern zur Einflussstärke konkretere Informationen z. B. aus Erfahrung, Versuchen oder Simulationsexperimenten vorliegen, können anstelle dieser Annahmen auch individuelle Werte für jede Einflussgröße in die Analyse einbezogen werden. Sie lassen sich z. B. durch einen paarweisen Vergleich der Einflussgrößen ermitteln:

Paarweiser Vergleich: Einflussstärke auf die "Größe der Auflageflächen" an der seitlichen Kettenlasche			Montagemaß zwischen AL	Geometrie der Laschen-Auflagen	Dicke der Laschen	Oberfläche der Auflageflächen	Laschenhöhe über Bohrung	Summe:		Resultierendes Pfadgewicht:
3.4	LSS 2.2, 2.3	Montagemaß zwischen AL		1	1	0	2	4	20%	2
3.7	WFP 2.1/2/3/4	Geometrie der Laschen-Auflagen	1		0	2	0	3	15%	1,5
3.9	WFP 2.1/2/3/4	Dicke der Laschen	1	2		2	1	6	30%	3
3.10	WFP 2.1/2/3/4	Oberfläche der Auflageflächen	2	0	0		0	2	10%	1
3.11	WFP 2.1/2/3/4	Laschenhöhe über Bohrung	0	2	1	2		5	25%	2,5
								Prüfsumme:	100%	

Kriterien: 0 = "geringerer Einfluss", 1 = "gleicher Einfluss", 2 = "größerer Einfluss"

Abbildung 5.10: Ermittlung von Einzelpfadgewichten durch paarweisen Vergleich

Da in Fallstudie I mehrere Zielgrößen untersucht wurden, entstand im vierten Bewertungsschritt eine Matrix, in der die Einflussstärken der Gestalt- und Prozessparameter auf die jeweiligen Zustands- und Funktionseigenschaften der rückensteifen Kette dargestellt sind. Diese Einflussmatrix (Abbildung 5.15) und ihre Auswertung werden in Kapitel 5.3.3 vorgestellt. Eine weiter detaillierte Ausführung dieses Beispiels unter Ableitung von Rückschlüssen für die Gestaltsynthese wird in Kapitel 5.3.3 und 5.4.1 vorgestellt.

5.3.2 Cluster-Trend-Analyse

Anhand einer Cluster-Trend-Analyse werden tabellarische Modelle erstellt, die eine visuelle Interpretation von Messdaten aus Versuchen ermöglichen. Diese Modelle unterstützen die Entwicklung von Erkenntnissen darüber, wie sich die Ausprägung einer Zielgröße bei Variation der Ausprägung einer Einflussgröße auswirkt. Daraus können Rückschlüsse zur Verbesserung von Produkteigenschaften gezogen werden, indem die betroffenen Parameter gezielt in eine günstige Richtung verändert werden.

Abbildung 5.11 zeigt links ein Cluster-Trend-Modell und rechts das dazugehörige Messdatendiagramm. Sie wurden in Fallstudie III eingesetzt, um zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Spitzenlänge (Einflussgröße) und der Einschraubzeit (Zielgröße) besteht.⁷⁰⁰ Hierbei wurde ein handelsübliches Tabellenkalkulationsprogramm verwendet. Das Vorgehen zur Modellbildung und zur Auswertung wird nachfolgend anhand eines Beispiels beschrieben:

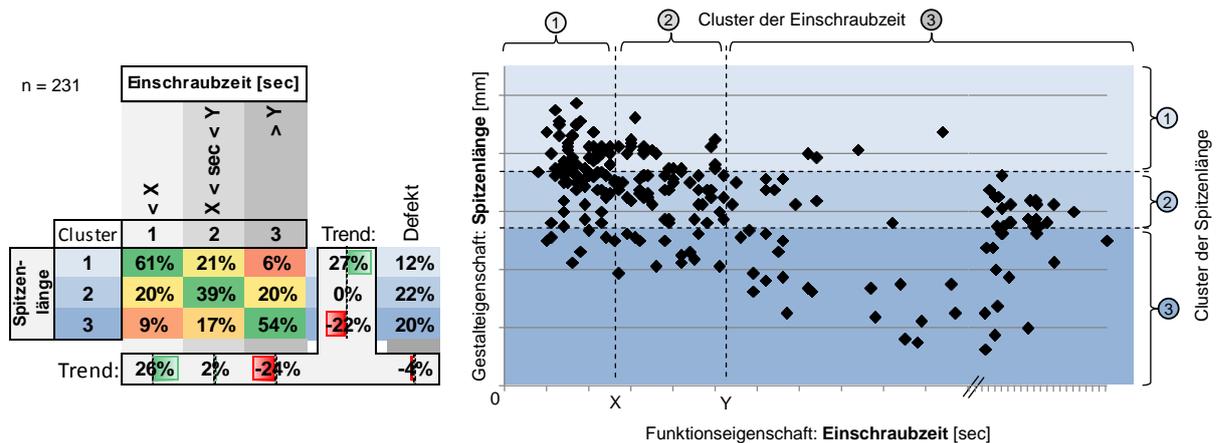


Abbildung 5.11: Cluster-Trend-Modell (links) und Messdatendiagramm (rechts) zur Analyse eines Wirkzusammenhangs zwischen der Spitzenlänge und der Einschraubzeit einer Blechbohrschraube⁷⁰⁰

1. Messdaten ermitteln:

Für eine ausgewählte Anzahl von Stichproben eines Referenzprodukts (z. B. in Fallstudie III: 231 Blechbohrschrauben) werden zunächst die mutmaßlich funktionsrelevanten Gestalt- und Prozessparameter ermittelt (z. B. Spitzenlänge, Abstand von der Spitze zum Gewindebeginn, Konturverlauf des Gewindes etc.).⁷⁰¹ Anschließend werden in Prüfstandsversuchen mit denselben Stichproben die interessierenden Zielgrößen ermittelt (z. B. Anpresskraft, Einschraubzeit, Ausfallrate, etc.). Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, können die Zielgrößen parallel im selben Versuch ermittelt werden. Vorteil: Dadurch werden auch die in der realen Anwendung auftretenden Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen erfasst.

Anschließend werden für jeden Prüfling die gemessenen Gestalt- und Prozessparameter sowie die gemessenen Zielgrößen tabellarisch notiert. Es bietet sich an, alle Messdaten in einer gemeinsamen Messdatentabelle zu notieren, um die anschließende Auswertung zu vereinfachen. Je mehr Prüflinge vermessen und geprüft werden, desto mehr Daten können später zur Bestimmung von Wirkzusammenhängen ausgewertet werden.

Die ermittelten Messdaten werden anschließend in einem Punktediagramm (siehe Abbildung 5.11 rechts) visualisiert. Jeder schwarze Punkt repräsentiert eine Stichprobe, für die z. B. eine bestimmte Spitzenlänge und eine bestimmte Einschraubzeit gemessen wurde. Sofern aus diesem Diagramm noch keine eindeutige Aussage über einen Wirkzusammenhang abgeleitet werden kann und eine hinreichend große Streuung der

⁷⁰⁰ vgl. Stürtzel 2012 S.63 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁰¹ Sofern die Stichproben bezüglich einer mutmaßlich funktionsbestimmenden Gestalteigenschaft keine signifikanten Variationen aufweisen, sollten an den Stichproben gezielt Manipulationen vorgenommen werden, um die Auswirkungen der Gestaltvariation untersuchen zu können.

Messwerte vorliegt, können die nachfolgenden Schritte zur Bildung eines Cluster-Trend-Modells durchgeführt werden:

2. Cluster definieren:

Die Daten eines Gestalt- oder Prozessparameters (z. B. die Spitzenlänge) werden in der Messdatentabelle nach ihrer Größe aufsteigend sortiert und dann in mindestens drei Intervalle unterteilt,⁷⁰² sodass jedes Intervall eine annähernd gleich große Anzahl an Stichproben enthält (Cluster-Bildung, siehe Abbildung 5.11 rechts: Cluster 1, 2 und 3 enthalten jeweils dieselbe Anzahl an Stichproben.).

Die korrespondierenden Messwerte einer interessierenden Zielgröße (z. B. die Einschraubzeit) werden ebenfalls in mindestens drei Intervalle unterteilt, sodass jedes Intervall eine annähernd gleich große Anzahl an Stichproben enthält. Hinweis: Sofern mehrere Cluster-Trend-Modelle gebildet werden (z. B. um den Einfluss mehrerer Gestalteigenschaften auf die Einschraubzeit zu ermitteln), sollten die definierten Intervallabstände (Grenzwerte X und Y in Abbildung 5.11) für alle Modelle konstant gehalten werden, um eine Vergleichbarkeit der Modelle zu gewährleisten.

Als Resultat dieser Segmentierung liegen mindestens neun Cluster vor, die jeweils eine unterschiedlich große Anzahl an Stichproben (genauer gesagt: Messdaten-Paare der Stichproben) enthalten. Sie bilden die Datenbasis für ein Cluster-Trend-Modell.

3. Cluster-Trend-Modell erstellen:

Zunächst wird für jedes Cluster die Anzahl der in Schritt 2 ermittelten Messdaten-Paare ermittelt. Aus der Gesamtzahl der ausgewerteten Messdaten-Paare kann bei ebenso die absolute Häufigkeit berechnet werden, mit der eine Messdaten-Paarung einem der neun Intervalle zugeordnet wurde.

Im dargestellten Beispiel wird eine Schraube mit einer besonders langen Spitze und einer Einschraubzeit $t < X$ Sekunden jeweils in Cluster 1 einsortiert. Die relative Häufigkeitsverteilung gibt an, dass 61 % der Schrauben, deren Spitzenlänge in Cluster 1 zugeordnet ist, eine Einschraubzeit $t < X$ Sekunden aufweisen. Ebenso wurde für 54 % der Schrauben, deren Spitzenlänge in Cluster 3 zugeordnet ist, eine Einschraubzeit $t > Y$ Sekunden gemessen. Defekte, die im Versuch zum Ausfall der Schraube führten, wurden in einer separaten Kategorie dokumentiert.⁷⁰³

4. Cluster-Trend-Modell auswerten:

Zur Auswertung eines Cluster-Trend-Modells werden die Einträge der Matrix entsprechend ihrer Häufigkeit eingefärbt (siehe Abbildung 5.11 links). Dadurch können Wirkzusammenhänge als Muster visuell leichter erfasst werden. Ergänzend zur Einfärbung der Häufigkeitswerte helfen die Trend-Werte unterhalb und in der Mitte der Tabelle dabei, Korrelationen aufzudecken. Ihre Berechnung erfolgt jeweils über den Mittelwert der Differenzen aus den links bzw. darüber liegenden Werten.

In Abbildung 5.11 zeigt die grün eingefärbte Diagonale an, dass (für den vorliegenden Testfall) bei einer großen Spitzenlänge tendenziell kürzere Einschraubzeiten realisiert werden können.

⁷⁰² Eine Segmentierung in mindestens drei Intervalle ermöglicht auch eine Auswertung von nicht linearen Wirkzusammenhängen.

⁷⁰³ Detaillierte Angaben zu den Wertebereichen der Cluster können entnommen werden aus Stürtzel 2012 S.62ff. (betreute Abschlussarbeit, Sperrvermerk bis 23.04.2017).

Die Streuung der ermittelten Messdaten⁷⁰⁴ (→Abbildung 5.11 rechts) führte in Fallstudie III dazu, dass eine manuelle Interpretation des Messdatendiagramms keine klare Erkenntnis über einen möglichen Wirkzusammenhang brachte. Das Cluster-Trend-Modell auf der linken Seite der Abbildung lieferte dagegen eine visuell leichter interpretierbare Zusammenfassung der Messdaten. Auf diese Weise konnten mehrere funktionsrelevante Einflussgrößen für die Gestaltung einer neuen Schraubenspitze ermittelt werden.⁷⁰⁵ Die ermittelte Korrelation zwischen der Spitzenlänge und der Einschraubzeit wurde mithilfe einer linearen Regressionsanalyse als statistisch signifikant bestätigt.⁷⁰⁶

In Abbildung 5.12 sind verschiedene Häufigkeitswerte und farblich Muster dargestellt, die bei der Auswertung streuender Messergebnisse in einem Cluster-Trend-Modell auf einen exponentiellen oder linearen Wirkzusammenhang hindeuten. Sofern die Häufigkeitswerte homogen eingefärbt sind, kann aus den ermittelten Messdaten kein Wirkzusammenhang geschlussfolgert werden.

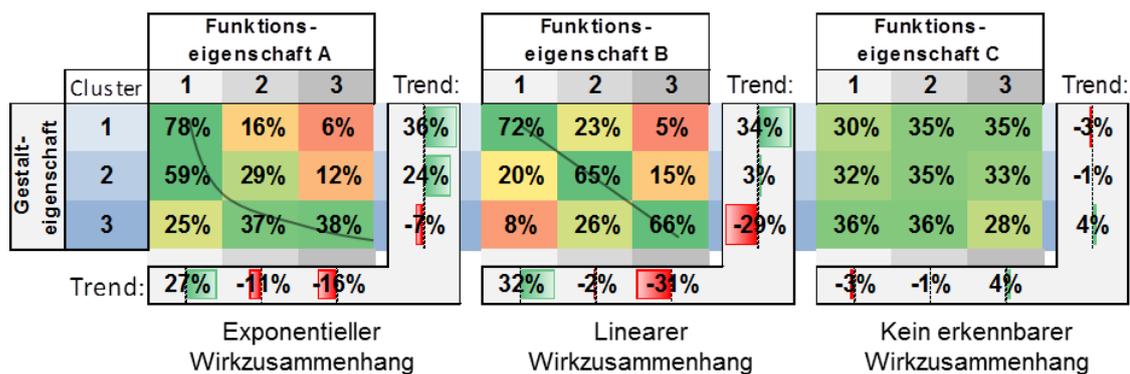


Abbildung 5.12: Typische Muster eines Cluster-Trend-Modells in Abhängigkeit von der Ausprägung eines Wirkzusammenhangs bei streuenden Messergebnissen

Je nach Problemstellung können Cluster-Trend-Modelle sowohl zur *explorativen* Bestimmung von Wirkzusammenhängen als auch zu *konfirmatorischen* Zwecken eingesetzt werden, um qualitative Hypothesen über einzelne Wirkzusammenhänge zu überprüfen. Ihr Spektrum umfasst sowohl solche Anwendungsfälle, bei denen einzelne Gestalt- oder Prozessparameter gezielt eingestellt werden können,⁷⁰⁷ als auch jene Problemstellungen, bei denen

⁷⁰⁴ Die signifikante Streuung der Messdaten wird auf Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gestalteigenschaften zurückgeführt, deren Ausprägungen aus fertigungstechnischen Gründen nicht konstant gehalten werden konnten. Vgl. Stürtzel 2012 S.7 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁰⁵ vgl. Stürtzel 2012 S.81 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁰⁶ vgl. Dammert 2013 S.55 (betreute Abschlussarbeit) mit $F[11, 187] = 4,272$ und $p < .001$

⁷⁰⁷ Dies entspricht dem Anwendungsgebiet der Statistischen Versuchsplanung, vgl. Kapitel 2.5.3

- eine gezielte *Einstellung* von Faktorstufenkombinationen⁷⁰⁸ nicht möglich ist, z. B. weil einzelne Eigenschaften eines Wirkflächenpaares oder einer Leitstützstruktur nicht isoliert voneinander veränderlich sind und/oder weil sie fertigungsbedingt zu stark streuen.
- eine gezielte *Auswahl* von Stichproben mit der gewünschten Faktorstufenkombination nicht mit einem vertretbaren Aufwand möglich ist. Bei streuenden Parametern ist dies meist bereits ab vier Einflussgrößen der Fall, da der Selektionsaufwand mit der Anzahl der untersuchten Einflussgrößen exponentiell ansteigt.
- eine exakte Bestimmung der Einflussstärke einzelner Einflussgrößen nicht notwendig ist, sondern Häufigkeitswerte zur Überprüfung qualitativer Hypothesen und zur Entwicklung von Gestaltungsideen ausreichen.

Der explorative Charakter des Verfahrens wird bereits bei der Messdatenerhebung und der Modellbildung deutlich. Anstelle diskreter Faktorstufen (die bei der statistischen Versuchsplanung üblich sind) werden kontinuierliche Wertebereiche in Cluster unterteilt. Dadurch müssen die Ausprägungen der untersuchten Einflussgrößen vor Versuchsbeginn nicht nach einem bestimmten Muster (Faktorstufenkombination) eingestellt werden. Der Aufwand zur Versuchsdurchführung liegt mit einer Empfehlung von 75 Stichproben⁷⁰⁹ auf einem vergleichbaren bzw. günstigeren Niveau als bei der statistischen Versuchsplanung, sofern mindestens acht Einflussgrößen untersucht werden sollen.⁷¹⁰

Eine weitere Stärke des vorgestellten Verfahrens liegt in der Möglichkeit, Wirkzusammenhänge ohne eine vorangestellte, qualitative Funktionsanalyse zu bestimmen. Ebenso werden im Vergleich zur statistischen Versuchsplanung keine speziellen mathematischen Methodenkompetenzen benötigt. Die Anwendung des vorgestellten Verfahrens wird daher für solche Fälle empfohlen, in denen statistische Methoden nicht oder nur eingeschränkt eingesetzt werden können, z. B. wenn

- die erforderliche Methodenkompetenz nicht vorhanden ist, oder
- Versuche nicht in der für statistische Analyseverfahren erforderlichen Genauigkeit durchgeführt werden können, oder

⁷⁰⁸ Unter einer Faktorstufenkombination wird in der Literatur eine bestimmte Kombination von Ausprägungen der untersuchten Gestalt- und Prozessparameter verstanden. vgl. Kleppmann 2013 S.145

⁷⁰⁹ Dadurch können mindestens 25 Stichproben pro Einflussgrößen-Cluster ausgewertet werden.

⁷¹⁰ Nach Kleppmann 2013 S.145 sind bei Anwendung statistischer Analyseverfahren für $k \leq 8$ Einflussgrößen maximal 64 Stichproben nötig, um eine statistisch „unkritische Ergebnisgüte“ zu erreichen. Bei $k = 9$ Einflussgrößen sind bereits 128 Stichproben erforderlich.

- eine gezielte Manipulation der funktionsbestimmenden Wirkorte nicht oder nur unter großem Aufwand möglich ist, das Referenzprodukt dafür jedoch eine erhebliche Streuung einzelner Konstruktionsparameter aufweist,⁷¹¹ oder
- mindestens neun Einflussgrößen auf ihre Funktionsrelevanz geprüft werden sollen, da der Untersuchungsaufwand dadurch (im Vergleich zu statistischen Verfahren) reduziert wird.

Als Einschränkung muss bei Anwendung des vorgestellten Verfahrens berücksichtigt werden, dass lediglich Häufigkeitswerte, nicht aber die Einflussstärke eines Gestalt- oder Prozessparameters ermittelt wird. Auch Wechselwirkungen bzw. indirekte Einflussbeziehungen zwischen mehreren Einflussgrößen können nicht bestimmt werden. Ebenso kann aus einem Cluster-Trend-Modell kein Rückschluss auf die statistische Signifikanz der ermittelten Häufigkeiten gezogen werden. Nach Erfahrung des Autors der vorliegenden Arbeit ist dies jedoch nicht zwingend erforderlich, um Gestaltungsideen für die Produktgenerationsentwicklung zu entwickeln: Bereits solch ein Hinweis darüber, wie sich eine Zielgröße durch eine Gestaltvariation verändert, trug in den begleiteten Fallstudien zur Ideenentstehung bei.⁷¹²

5.3.3 Einflussmatrix- und Cluster-Matrix-Analyse

Eine Einflussmatrixanalyse ermöglicht eine vergleichende Gegenüberstellung mehrerer Wirkzusammenhänge zur Ermittlung der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter. Die Bezeichnung ist abgeleitet aus einer tabellarischen Darstellungsform, in der zeilenweise die Gestalt- bzw. Prozessparameter und spaltenweise die Funktionen bzw. Funktionseigenschaften aufgetragen werden. Je nach Anwendungsfall und Zweck der Modellbildung können die innere Struktur einer Einflussmatrix und das Verfahren zur vergleichenden Bewertung der Matrixeinträge variieren. Auf den nachfolgenden Seiten werden einige Beispiele gegeben.

In der Literatur wird der Begriff Einflussmatrix⁷¹³ für Modelle verwendet, in denen dieselben Größen in den Zeilen und Spalten einer Tabelle dargestellt und hinsichtlich einer Ursache-Wirkung-Beziehung untereinander verglichen werden. Dazu werden zunächst die kausalen Zusammenhänge zwischen den untersuchten Einflussgrößen ermittelt (z. B. mit Methoden der qualitativen Funktionsanalyse aus Kapitel 5.2), dann

⁷¹¹ In diesem Fall müssten bei Anwendung der statistischen Versuchsplanung genau jene Proben gesucht werden, die die benötigten Faktorstufenkombinationen aufweisen. Der Selektionsaufwand steigt dabei exponentiell mit der Anzahl der untersuchten Einflussgrößen k . Bereits ab $k = 4$ kann ein exploratives Vorgehen mithilfe einer Cluster-Trend-Analyse sinnvoll (weil effizienter) sein.

⁷¹² siehe Kapitel 5.4. Die auf diese Weise entstandenen Ideen sind zunächst Annahmen, die es in nachfolgenden Schritten zu überprüfen gilt.

⁷¹³ Synonym dazu werden auch die Begriffe „Korrelationsmatrix“ und „Vernetzungstabelle“ verwendet. vgl. Gausemeier 2009 S.67f.

die Einflussstärken relativ zueinander abgeschätzt⁷¹⁴ und die Zahlenwerte in die korrespondierenden Matrixzellen eingetragen. Die Kumulation der Einflussstärken lässt Rückschlüsse auf aktive, passive, kritische und inerte Einflussgrößen zu.⁷¹⁵

Erfahrungsbasierte Selektion funktionsbestimmender Einflussgrößen

Das zuvor genannte Grundprinzip wird für die vorgeschlagene Modellierungstechnik aufgegriffen und abgewandelt, um aus der Menge funktionsrelevanter Einflussgrößen die funktionsbestimmenden Parameter auszuwählen. Dazu werden Gestalt- oder Prozessparameter zeilenweise und Funktionen bzw. Funktionseigenschaften spaltenweise in einer Einflussmatrix dargestellt (Abbildung 5.13). Sie werden zuvor z. B. mithilfe der in Kapitel 5.2 empfohlenen Modellierungstechniken ermittelt. Aus der Zeilensumme wird anschließend die relative Einflussstärke eines Gestalt- oder Prozessparameters bestimmt. Durch Vergleich dieser Werte werden funktionsbestimmende Einflussgrößen ausgewählt.

In Abbildung 5.13 wird beispielsweise die „Dicke der inneren Dämmung“ als eine funktionsbestimmende Eigenschaft der entsprechenden Leitstützstruktur einer Kälterohrschelle bewertet. Diese Schlussfolgerung ergibt sich durch Vergleich der kumulierten relativen Einflussstärken der dargestellten Gestalteigenschaften. Die „Wärmeleitfähigkeit“ als spezifische Gestalteigenschaft derselben Leitstützstruktur wird hingegen lediglich für die Funktionseigenschaft „Isolationsvermögen“ als funktionsrelevant eingestuft. Diese Vorauswahl ermöglicht eine gezielte Definition von Testfällen, um in Versuchen und Simulationsexperimenten das Isolationsvermögen der Kälterohrschelle bei variierenden Gestalteigenschaften zu überprüfen.

		Funktionseigenschaft			
		Isolationsvermögen	Lastaufnahme	Diffusionsdichtigkeit	Kumulierte relative Einflussstärke
Gestalt-eigenschaft	Wärmeleitfähigkeit innere Dämmung	3	0	0	3
	Druckfestigkeit innere Dämmung	2	3	0	5
	Dicke innere Dämmung	3	2	1	6
	Dicke äußere Dämmung	2	0	1	3

Einflussstärke von Gestalteigenschaften (Zeilen) auf Funktionseigenschaften (Spalten) einer **Kälterohrschelle**
von 0 = kein Einfluss
bis 3 = starker Einfluss

Abbildung 5.13: Ausschnitt einer Einflussmatrix zur Bewertung der Einflussstärke von Gestalteigenschaften einer Kälterohrschelle auf deren Funktionseigenschaften⁷¹⁶

⁷¹⁴ Hierbei wird meist eine Ordinalskalierung verwendet, z. B. Zahlenwerte von 0 = „ein Einfluss“ bis 3 = „sehr großer Einfluss“. Ein Beispiel für diese Ordinalskalierung gibt Abbildung 5.13.

⁷¹⁵ siehe Abbildung 2.15 und Abbildung 2.16 in Kapitel 2.5.2; vgl. Leiser 2011 S.36f. (betreute Abschlussarbeit)

Je Anwendungsfall kann das gewählte Bewertungsprinzip flexibel an den Zweck der Modellbildung angepasst werden. Sofern ausreichend Informationen für eine weiter detaillierte Abschätzung von Wirkzusammenhängen vorliegen, bietet es sich an,

- die Einflussbeziehungen der Zeilen- auf die Spalteneinträge alternativ auch nominalskaliert [+; -] hinsichtlich ihrer Einflussrichtung oder intervallskaliert [+2; +1; -1; -2] hinsichtlich ihrer Einflussstärke und Einflussrichtung (E) zu bewerten. Als Beispiel könnte in Abbildung 5.13 auch die Vermutung geäußert werden, dass die „Dicke der inneren Dämmung“ einen großen Einfluss [+2] auf das Isolationsvermögen hat. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn für alle anderen Matrixeinträge ebenfalls Bewertungen auf derselben Skala vorgenommen werden können.
- Funktionen und Funktionseigenschaften ergänzend intervallskaliert [0 bis 10] hinsichtlich ihrer Bedeutung (B) für die geforderte Zielerreichung zu bewerten. Als Beispiel könnte in Abbildung 5.13 die Lastaufnahme als besonders wichtig [9], das Isolationsvermögen jedoch nur eingeschränkt wichtig [3] für den untersuchten Anwendungsfall beurteilt werden. Dadurch ergäbe sich eine Verschiebung bei den kumulierten relativen Einflussstärken zugunsten der „Druckfestigkeit innere Dämmung“: Durch eine Gestaltvariation an diesem Parameter ließe sich demnach die größte Funktionsverbesserung erzielen.

Die kumulierte relative Einflussstärke (KRE) einzelner Gestalteigenschaften ergibt sich nach diesem Bewertungssystem aus dem Quotient der positiven und negativen Gewichtungssummen als Zahlenwert im Intervall [-1; 1].

Beispiel aus Fallstudie VI: Für die Gestaltvariation „Kontur der *Schwarzfärbung am Rand der Windschutzscheibe absenken*“ (Abbildung 5.14) wird die kumulierte relative Einflussstärke ermittelt aus:

$$KRE_{\text{Schwarzfärbung reduzieren}} = \frac{\sum_- E \cdot B + \sum_+ E \cdot B}{\sum_- E \cdot B - \sum_+ E \cdot B} = \frac{(-1 \cdot 5) + (2 \cdot 10)}{-(-1 \cdot 5) + (2 \cdot 10)} = \frac{15}{25} = 0,6$$

mit: KRE = kumulierte relative Einflussstärke eines Gestalt- oder Prozessparameters
 E = geschätzte Einflussrichtung und -stärke eines Gestalt- oder Prozessparameters
 B = Bedeutung einer Funktion für die geforderte Zielerreichung

Der Zahlenwert gibt Auskunft darüber, welche Auswirkung bei einer inkrementellen Änderung eines Konstruktionsparameters auf die Zielstellung „Sicht aus dem Cockpit auf die Straße verbessern“ erwartet wird. Negative Werte deuten auf eine tendenzielle Beeinträchtigung der Sicht auf die Straße hin, wohingegen positive Werte eine voraussichtliche Verbesserung der Funktionserfüllung angeben.

⁷¹⁶ nach Leiser 2011 S.37 (betreute Abschlussarbeit)

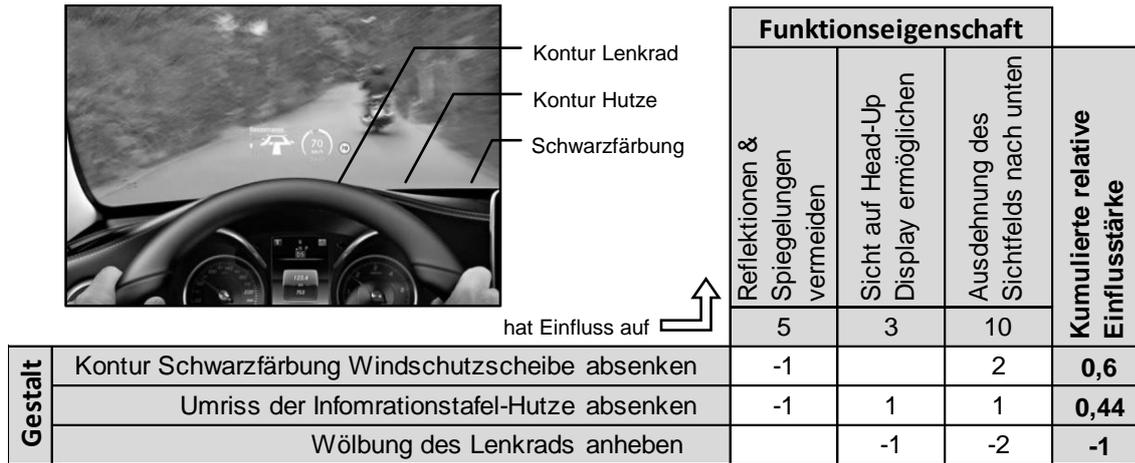


Abbildung 5.14: Vergleichende Bewertung der Einflussstärke geometrischer Gestalteigenschaften für die Zielgröße „Sicht auf die Straße“⁷¹⁷

Nach Abschluss der Bewertung werden durch Vergleich der kumulierten, relativen Einflussstärken diejenigen Gestalt- oder Prozessparameter ausgewählt, die auf mehrere Zielgrößen einen großen Einfluss haben. In Abbildung 5.14 wäre beispielsweise die „Wölbung des Lenkrads“⁷¹⁸ eine solche Einflussgröße. Durch eine Variation dieser Gestalteigenschaft ließe sich nach Ansicht der beteiligten Systemkonstrukteure sowohl das Sichtfeld als auch die Erfassung fahrzustandsrelevanter Informationen über ein Head-Up-Display verbessern.⁷¹⁹

Für die ausgewählten Gestalt- oder Prozessparameter sollten anschließend Gestaltungsideen erarbeitet (siehe Kapitel 5.4) und Testfälle definiert werden, um anhand von Versuchen und Simulationsexperimenten die Verbesserungspotenziale für die ausgewählten Zielgrößen zu bestimmen. In Fallstudie VI wurde dazu eine Simulation entwickelt, mit der die Sicht auf die Straße in CAD-Modellen für zwei geometrische Zielgrößen (Ausdehnung des Sichtfelds, Homogenität des Sichtfeldrands) und für unterschiedliche Fahrzeuginsassen exakt bestimmt werden kann.⁷²⁰

Die Stärke der Einflussmatrixanalyse liegt demzufolge in der Möglichkeit, Einfluss- und Zielgrößen einander so gegenüberzustellen, dass eine Vorauswahl der potenziell funktionsbestimmenden Einflussgrößen bereits durch eine einfache Bewertung von Wirkzusammenhängen möglich ist. Durch diese Bewertung werden beispielsweise der prognostizierte *Vernetzungsgrad* und die vermutete *Einflussstärke*

⁷¹⁷ Bildquelle: Mercedes Benz

⁷¹⁸ als Eigenschaft der Wirkfläche an der Lenkrad-Oberseite, die ein Wirkflächenpaar mit einem Sichtstrahl bildet, der vom Augpunkt des Fahrers ausgeht.

⁷¹⁹ vgl. Kubel 2013 S.62 (betreute Abschlussarbeit)

⁷²⁰ Schutzrecht DE102013001365A1 (2014-07-31), Felix Kubel (aus betreuter Abschlussarbeit)

ersichtlich. Der Vernetzungsgrad gibt an, ob nur einzelne oder gar mehrere Funktionen bzw. Funktionseigenschaften von Änderungen an einem Gestalt- oder Prozessparameter betroffen sind. Die Analyse der Einflussstärke gibt wiederum Aufschluss darüber, ob es sich um eine (im Sinne der Zielstellung des Projekts) funktionsrelevante oder funktionsbestimmende Einflussgröße handelt, die als Stellhebel bei der Synthese genutzt werden kann. In Abbildung 5.14 wird beispielsweise die „Wölbung des Lenkrads“ als eine funktionsbestimmende Einflussgröße eingestuft (für die Zielgröße „Sicht auf die Straße“), da sie die höchste kumulierte relative Einflussstärke aufweist. Durch ein Absenken der Lenkradwölbung ließe sich den Annahmen zufolge diese Zielgröße verbessern.⁷²¹

Der universelle Charakter einer Einflussmatrix ermöglicht ihren Einsatz in unterschiedlichen Anwendungsfällen. Nachfolgend werden aus den Fallstudien der vorliegenden Forschungsarbeit drei weitere Anwendungsfälle vorgestellt, bei denen eine Einflussmatrix als zentrales methodisches Hilfsmittel zur Funktionsanalyse genutzt wurde. Die ausgewerteten Daten wurden durch Erfahrungswerte und Expertengespräche (Fallstudie I), anhand von Simulationen (Fallstudie II) und mithilfe von Versuchen (Fallstudie III) ermittelt. Die Modellbildung erfolgte dabei ausschließlich über die Grundfunktionen eines handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramms. Je nach Bedarf kann die Handhabung der Matrizen durch Makros vereinfacht werden – in den Fallstudien wurden sie jedoch rein manuell bearbeitet.

Zur Beschreibung indirekter Wirkzusammenhänge ist die in Kapitel 5.3.1 vorgestellte Einflusspfadanalyse besser geeignet. Im nachfolgenden Abschnitt wird das dazu passende Auswertungsverfahren beschrieben.

Erfahrungsbasierte Bewertung multivariater Wirkzusammenhänge

In Kapitel 5.3.1 wurde ein Verfahren zur Erstellung von Pfaddiagrammen vorgestellt, mit dem Hypothesen über Wirkzusammenhänge formuliert werden können. Die Auswertung erfolgte in Fallstudie I mithilfe einer Einflussmatrix, in der die Einflussbeziehungen eines einzelnen Gestalt- oder Prozessparameters auf mehrere Zustands- und Funktionseigenschaften dargestellt werden können.

In dieser Matrix (Abbildung 5.15) sind zeilenweise die einzelnen Gestalt- und Prozessparameter sowie spaltenweise die untersuchten Funktions- und Zustandseigenschaften der rückensteifen Antriebskette aufgetragen. Auf der linken Seite der Matrix sind darüber hinaus die einzelnen Möglichkeiten der Gestaltvariation angegeben. In den weiß ausgeführten Feldern sind jeweils die Gesamtpfadgewichte

⁷²¹ Zur Beurteilung der Tragfähigkeit dieser Gestaltungsidee müssen ggf. daraus resultierende Restriktionen und Änderungsaufwände abgeschätzt werden! Siehe Kapitel 5.4.3.

der Pfadanalyse als Absolut- und Relativwerte dargestellt. Sie wurden auf Grundlage von Experteneinschätzungen nach dem in Kapitel 5.3.1 erläuterten Schema ermittelt und geben Auskunft über die relativen Einflussstärken der Gestalt- und Prozessparameter im Vergleich zueinander.

Bei der Interpretation der Einflussmatrix ist darauf zu achten, dass die dargestellten Zahlenwerte *nicht die tatsächlichen Einflussstärken* wiedergeben. Es handelt sich vielmehr um *Ersatzgrößen*, die einen Vergleich der Einflussstärken der einzelnen Gestalt- und Prozessparameter zueinander ermöglichen. Der Grund dafür liegt in ihrer Entstehung: Sie ergeben sich nicht aus einer statistisch abgesicherten Messdatenauswertung, sondern aus dem in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Pfadanalyse-Verfahren, bei dem es sich nicht um ein konfirmatorisches Verfahren handelt. Vielmehr dient eine Einflussmatrix dazu, die formulierten Hypothesen über Wirkzusammenhänge zu präzisieren, indem die jeweiligen Gesamtpfadgewichte gebildet werden.

Je nachdem, in welche Richtung eine Änderung an einer Einflussgröße vorgenommen wird, resultiert eine Veränderung der korrespondierenden Funktions- oder Zustandseigenschaften. Dieser Sachverhalt wird in der Matrix mit einer „+/-“-Kennzeichnung visualisiert. Bei Verringerung des Montagemaßes (Parameter 3.4) ist beispielsweise eine reduzierte Seitenbogengängigkeit („-“) zu erwarten, die vergleichbar zu einer Erhöhung der Laschendicke (Parameter 3.9) eingeschätzt wird. Diese Erhöhung der Laschendicke reduziert die Torsion („-“) und erhöht gleichzeitig die Verspannung („+“) der Kettenglieder zueinander.

Die Einflüsse der spaltenweise dargestellten Funktions- und Zustandseigenschaften auf die Rückensteifigkeit der Antriebskette wurden in der Kopfzeile der Matrix ebenfalls mit „+“ oder „-“ bewertet. So geht nach Expertenmeinung des Unternehmens von einer Torsion der Kettenglieder (Parameter 1.5) ein negativer Einfluss auf die Rückensteifigkeit aus, wohingegen eine starke Verspannung der Kettenglieder (Parameter 1.3) die Rückensteifigkeit fördert. Konstruktionsbedingt wird angenommen, dass sich eine erhöhte Seitenbogengängigkeit (Parameter 1.1) negativ auf die Rückensteifigkeit auswirkt.⁷²²

Die Einflussmatrix ermöglicht eine vergleichende Bewertung einzelner Gestalt- und Prozessparameter bezüglich ihres Einflusses auf die untersuchten Funktions- und Zustandseigenschaften der Antriebskette. Die jeweils einflussstärksten Parameter sind in der Einflussmatrix hervorgehoben dargestellt. Für die Seitenbogengängigkeit werden demzufolge das „Montagemaß zwischen den Außenlaschen“ (LSS 2.2 und 2.3) und die „Dicke der Laschen“ (WFP 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) als funktionsbestimmende

⁷²² vgl. Tian 2011 S.65 (betreute Abschlussarbeit)

Einflussgrößen bewertet.⁷²³ Die Zustandseigenschaften „Durchhang“, „Verspannung“ und „Torsion“ der Kettenglieder werden dagegen vorwiegend vom „Schultermaß der Laschen“ (LSS 2.1, 2.2, 2.4, 2.5) beeinflusst. Die „Geometrie der Laschen-Auflageflächen“ (WFP 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) bestimmt maßgeblich die „maximal übertragbare Druckkraft ohne Knicken“.

Das Ziel der Funktionsanalyse in Fallstudie I war die Bestimmung von Gestalt- und Prozessparametern, die einen signifikanten Einfluss auf die Rückensteifigkeit der Kette haben. Die Einflusswerte werden zu diesem Zweck zeilenweise aufsummiert: Sofern die Änderung einer Einflussgröße (z. B. ein erhöhtes Schultermaß der Laschen, Parameter 3.6)

- einen positiven Einfluss auf eine Funktions- oder Zustandseigenschaft hat und
- sich diese Eigenschaft positiv auf die Rückensteifigkeit auswirkt,

so wird der Einflusswert⁷²⁴ addiert. Wirkt sich hingegen eine Änderung negativ aus, verringert sich die kumulierte Einflussstärke entsprechend.

Um eine differenzierte Bewertung der einzelnen Zielgrößen zu ermöglichen, werden sie in der Kopfzeile der Matrix zusätzlich auf einer Skala von 1 (wenig wichtig) bis 5 (sehr wichtig) bewertet. Der relative, kumulierte Einfluss der einzelnen Gestalt- und Prozessparameter errechnet sich dadurch aus der Summe der jeweiligen Einflusswerte eines Parameters, multipliziert mit dieser Gewichtung. Durch die Wahl der Vorzeichen wird bei der Multiplikation berücksichtigt, ob

- eine Änderung an einem Gestalt- oder Prozessparameter eine positive oder negative Auswirkung auf die jeweilige Zielgröße hat („+/-“-Kennzeichnung in der jeweiligen Zeile der Matrix);
- eine Zielgröße einen positiven oder negativen Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung hat („+/-“-Kennzeichnung in der Kopfzeile der Matrix).

Eine erhöhte „Dicke der Laschen“ (Parameter 3.9) hat demnach den folgenden relativen, kumulierten Einfluss (RKE) auf die Rückensteifigkeit der Kette:

$$RKE_{3,9 \text{ erhöhen}} = \frac{(23\% \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot 3 + 10,2\% \cdot (1) \cdot (1) \cdot 3 + 6,7\% \cdot (1) \cdot (1) \cdot 3 + 12,7\% \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot 4)}{3+3+3+4} = 13,1\%$$

Bei multivariaten Wirkzusammenhängen kann es vorkommen, dass durch die Variation von Gestalteigenschaften mehrere gegensinnige Veränderungen auf eine funktionale Zielgröße resultieren – insbesondere, wenn mehrere positive „+“ und negative „-“ Relationen bestehen bzw. in der Kopfzeile der Matrix vermerkt sind. Dies bedeutet zum einen, dass sich die Auswirkung einzelner Gestaltvariationen kompensieren können und zum anderen, dass der prognostizierte Einfluss (RKE)

⁷²³ WFP = Wirkflächenpaar, LSS = Leitstützstruktur

⁷²⁴ Ein Einflusswert entspricht dem Gesamtpfadgewicht (Berechnung siehe Kapitel 5.3.1).

einer Gestalteeigenschaft auf die betrachtete Zielgröße im weiteren Verlauf der Konstruktionsarbeiten kritisch geprüft werden sollte. Der Grund dafür liegt in der zunehmenden Verkettung (bzw. im mathematischen Sinne in der Multiplikation) der Unsicherheiten, die bezüglich der Prognose von Relationen zwischen den einzelnen Parametern eines Wirkzusammenhangs bestehen.⁷²⁵

Als Ergebnis der Einflussmatrixanalyse können aus der rechten Matrixspalte in Abbildung 5.15 diejenigen funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter abgelesen werden, für die bei einer Änderung ihrer Ausprägung eine signifikante Auswirkung auf die Rückensteifigkeit der Kette erwartet wird. Daraus sind unmittelbare Rückschlüsse auf Gestaltungsideen möglich (→ Kapitel 5.4.1).

Simulationsgestützte Bewertung multivariater Wirkzusammenhänge

In Fallstudie II⁷²⁶ konnten zusätzlich zu Expertengesprächen auch Simulationsexperimente zu den thermischen Eigenschaften einer Kälterohrschelle durchgeführt werden. Im Fokus standen dabei das Isolationsvermögen der Kälterohrschelle und die Spannungszustände unter Last. Durch die Simulationsexperimente flossen nicht nur Erfahrungswerte in die Bewertung der Einflussstärke einzelner Konstruktionsparameter ein, sondern auch prognostizierte Daten über das Produktverhalten bei geänderten Gestalteeigenschaften. Die Ergebnismenge der Einflussmatrixanalyse wurde dadurch in jenen Punkten weiter gesteigert, in denen Erfahrungswerte über Wirkzusammenhänge nur eingeschränkt vorlagen.

Ein weiteres Beispiel für eine simulationsgestützte Bewertung von Wirkzusammenhängen stellt ALBERS im Kontext der Antriebssystementwicklung mit der X-in-the-Loop Methodik vor.⁷²⁷ So ist es möglich, das weiterzuentwickelnde Referenzprodukt rein virtuell durch numerische Modelle zu beschreiben und in Simulationsexperimenten die mutmaßlich funktionsbestimmenden Parameter zu variieren. Die funktionsrelevanten Umgebungs-Systeme können dabei sowohl virtuell als auch physisch über Prüfstände an die Simulationen angeschlossen werden. Aus den prognostizierten Ergebnissen lassen sich entsprechend Gestaltungsideen zur konstruktiven Modifikation der Produktgestalt ableiten (Test-based-Development).⁷²⁸

⁷²⁵ Anschaulich wird diese Verkettung von Unsicherheiten am Beispiel der komplexen Pfadbeziehungen in Abbildung 5.9. Jeder Pfeil beschreibt eine Relation, die als Prognose mit einer natürlichen Unsicherheit behaftet ist.

⁷²⁶ vgl. Leiser 2011 (betreute Abschlussarbeit)

⁷²⁷ vgl. Albers 2008a

⁷²⁸ vgl. Albers 2015a

Versuchsgestützte Bewertung multivariater Wirkzusammenhänge

In Fallstudie III⁷²⁹ erfolgte die quantifizierte Bewertung der Wirkzusammenhänge nicht über Erfahrungswerte und Expertengespräche, sondern durch explorative Auswertung von Messdaten aus einer Versuchsreihe. Bei dem angewandten Analyseverfahren (Cluster-Trend-Analyse, siehe Kapitel 5.3.2) wird nicht die Einflussstärke eines Wirkzusammenhangs, sondern die Häufigkeitsverteilung in einem Cluster-Trend-Modell als Bewertungskriterium verwendet, um funktionsrelevante Gestalteigenschaften zu ermitteln.

Die vergleichende Bewertung der einzelnen Wirkzusammenhänge erfolgt durch eine Zusammenfassung mehrerer Cluster-Trend-Modelle zu einer Matrix. Diese ermöglicht eine vergleichende Bewertung mehrerer Messdatenmodelle auf einen Blick. Durch die einheitlich formatierte Darstellung werden unterschiedlich skalierte Messdaten⁷³⁰ in einem gemeinsamen Messdatenmodell übersichtlich dargestellt. Dadurch wird vermieden, dass je nach Art der untersuchten Einflussgrößen Schlussfolgerungen aus unterschiedlichen Messdatendiagrammen, Tabellen und Notizen gezogen werden müssen.

Abbildung 5.16 zeigt einen Ausschnitt aus einer solchen Matrix, in der die Cluster-Trend-Modelle von drei Einflussgrößen und drei Funktionseigenschaften einander gegenüber gestellt sind. Die Auswertung der Darstellung erfolgt durch vergleichende

	Cluster	Kumulierte Einschraubzeit			Trend:	Dauer Vorverdrängen			Trend:	Dauer Spanen & Verdrängen			Trend:	Defekt
		1	2	3		1	2	3		1	2	3		
Spitzenlänge	1	61%	21%	6%	28%	39%	35%	26%	7%	56%	35%	8%	24%	12%
	2	20%	39%	20%	0%	32%	32%	35%	-2%	25%	42%	33%	-4%	22%
	3	9%	17%	54%	-23%	29%	32%	39%	-5%	15%	15%	70%	-23%	20%
	Trend:	26%	2%	-24%	①	5%	2%	-7%	②	21%	10%	-31%	③	-4%
Gewinde- Spitzen- Abstand	1	45%	19%	13%	16%	51%	34%	15%	18%	52%	32%	16%	18%	23%
	2	27%	27%	26%	1%	35%	33%	31%	2%	30%	37%	33%	-2%	20%
	3	9%	34%	46%	-19%	7%	31%	62%	-23%	12%	27%	61%	-25%	12%
	Trend:	18%	-8%	-17%	④	22%	2%	-24%	⑤	20%	3%	-23%	⑥	6%
S-Form	1	50%	24%	15%	18%	46%	38%	15%	16%	57%	35%	9%	24%	12%
	2	39%	21%	21%	9%	35%	35%	29%	3%	41%	31%	28%	7%	19%
	3	16%	30%	34%	-9%	29%	30%	41%	-6%	22%	33%	45%	-12%	20%
	Trend:	17%	-3%	-10%	⑦	9%	4%	-13%	⑧	18%	1%	-13%	⑨	-4%

Abbildung 5.16: Vergleichende Zusammenstellung mehrerer Cluster-Trend-Modelle in einer Matrix zur Analyse multivariater Wirkzusammenhänge

⁷²⁹ vgl. Stürtzel 2012 (betreute Abschlussarbeit)

⁷³⁰ Siehe Tabelle 2-3 in Kapitel 2.4.2

Interpretation der neun Matrixsegmente (MS).⁷³¹ Dabei sind im gewählten Untersuchungsbereich sowohl Hinweise auf lineare Wirkzusammenhänge (MS 1, 3, 4, 5, 6, 9) als auch auf exponentielle Wirkzusammenhänge (MS 7, 8) erkennbar.⁷³² Die Streuung der Häufigkeitswerte ist sowohl auf Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen, als auch auf die eng abgestuften Wertebereiche der Gestalteigenschafts-Cluster zurückzuführen.

Aufgrund der ausgeprägt differenzierten Häufigkeitsverteilungen konnte nicht nur die „Spitzenlänge“ als signifikant funktionsbestimmende Gestalteigenschaft der Blechbohrschraube ermittelt werden; auch die Gestalteigenschaften „Gewinde-Spitzen-Abstand“ und „S-Form“ wurden jeweils als funktionsrelevante Einflussgrößen eingestuft. Für alle drei dargestellten Funktionseigenschaften wird daher von einem multivarianten Wirkzusammenhang ausgegangen.⁷³³ Eine mögliche Verwendung dieser Erkenntnisse⁷³⁴ für die Gestaltsynthese wird im nachfolgenden Kapitel 5.4.2 exemplarisch erläutert.

Die vorgestellte Modellierungstechnik hat Ähnlichkeiten zu einer Streudiagramm-Matrix, in der mehrere Streudiagramme zu Vergleichszwecken gegenübergestellt werden. Die Zahlenwerte in den Zellen eines Cluster-Trend-Modells entsprechen dabei der relativen Anzahl der Messpunkte eines korrespondierenden Streudiagramms. Anstelle von Streudiagrammen werden in der vorliegenden Arbeit die einzelnen Cluster-Trend-Modelle zusammengestellt. Hieraus ergibt sich der Vorteil, dass Wirkzusammenhänge auch bei stark streuenden Messdaten leicht visuell erfasst werden können (siehe Abbildung 5.11).

5.3.4 Zwischenfazit

Die vorgestellten Modellierungstechniken zeigen ein breites Spektrum von Modellierungstechniken zur quantitativen Analyse von Wirkzusammenhängen auf. Sie sollten je nach Anwendungsfall flexibel an den Zweck der Modellbildung angepasst und miteinander kombiniert werden. Sowohl die Einflusspfadanalyse als auch die Cluster-Trend-Analyse sind dazu geeignet, komplexe Wirkzusammenhänge grafisch aufzubereiten. Eine quantitative Auswertung dieser Modelle erfolgt mithilfe einer Einflussmatrixanalyse, mit der die funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter bestimmt werden können.

⁷³¹ In Abbildung 5.12 sind typische Muster als Referenzbeispiele beschrieben.

⁷³² Um die Auswertung zu erleichtern, wurden Hilfslinien in die Cluster-Trend-Modelle eingezeichnet.

⁷³³ vgl. Stürtzel 2012 S.61, S.74, S.82, S.88ff. (betreute Abschlussarbeit)

⁷³⁴ Diese Erkenntnisse stellen ein Ergebnis einer Problemeingrenzung im Sinne des SPALTEN-Prozesses dar, vgl. Albers 2005

Der Einsatzbereich dieser drei Modellierungstechniken umfasst primär jene Konstruktionsprojekte, in denen Methoden der statistischen Versuchsplanung nicht oder nur eingeschränkt angewendet werden können. In den begleiteten Fallstudien war dies beispielsweise der Fall, wenn die erforderliche Methodenkompetenz nicht vorhanden war, wenn Versuche nicht durchgeführt werden konnten oder wenn eine gezielte Einstellung von Faktorstufenkombinationen an Referenzprodukten nicht möglich war.

Bei einem Vergleich zu statistischen Analyseverfahren zeigt sich, dass mit den vorgeschlagenen Modellierungstechniken keine Aussagen über *absolute* physikalische Wirkzusammenhänge, z. B. in Form von mathematischen Gleichungen, möglich sind. Es ist jedoch möglich, die *relative* Einflussstärke der funktionsrelevanten Einflussgrößen zu bestimmen und Prognosen darüber zu formulieren, ob sich inkrementelle Änderungen an einzelnen Gestalt- und Prozessparametern positiv oder negativ auf das Produktverhalten auswirken. Dieser Erkenntnisgewinn war in den begleiteten Entwicklungsprojekten bereits ausreichend, um gezielte Gestaltungsideen zur Verbesserung von Funktionen deduktiv abzuleiten und die Tragweite dieser Gestaltungsideen hinsichtlich konstruktiver Zielkonflikte abzuschätzen. Das Vorgehen dazu wird nachfolgend in Kapitel 5.4 vorgestellt.

5.4 Deduktive Synthese von Gestaltungsideen

Die in den vorangegangenen Teilkapiteln beschriebenen Methoden und Modellierungstechniken sollen Systemkonstrukteure einerseits dabei unterstützen, ein vertieftes Systemverständnis und Annahmen über technische Wirkzusammenhänge zu entwickeln.⁷³⁵ Der Zweck der Modellbildung liegt andererseits in der Auswahl der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter eines Referenzprodukts, die in einem bestimmten Anwendungsfall einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung haben.

Mit diesem Systemverständnis wird die Grundlage für eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen gelegt. Sie werden zunächst in Form von Hypothesen formuliert, die besagen, dass bestimmte Variationen an Konstruktionsparametern voraussichtlich zur gewünschten Verbesserung der adressierten Funktionen und Funktionseigenschaften führen werden. Diese Variationen der Produktgestalt werden in Form von Skizzen, Zeichnungen und virtuellen Modellen beschrieben. Anschließend müssen sie durch Versuche und Simulationsexperimente überprüft

⁷³⁵ siehe Kapitel 5.1.3

werden.⁷³⁶ Diese Analyse- und Syntheseschritte bilden den vorläufigen Abschluss der in Kapitel 5.1 erläuterten Vorgehenssystematik.

In den nachfolgenden Abschnitten wird exemplarisch aufgezeigt, wie aus den Erkenntnissen über multivariate Wirkzusammenhänge, die mithilfe von Einflussmatrizen⁷³⁷ ermittelt werden, Gestaltungsideen deduktiv abgeleitet werden können.

5.4.1 Fallstudie I: Rückensteifigkeit einer Antriebskette verbessern

Mithilfe der in Kapitel 5.3.3 vorgestellten Einflussmatrixanalyse wurden in Fallstudie I einerseits solche Gestalt- und Prozessparameter ausgewählt, die auf eine *einzelne* Funktion oder Funktionseigenschaft den größten Einfluss haben. Dazu wurden in Abbildung 5.17 aus der betreffenden Spalte die Parameter mit der größten Einflussstärke ausgewählt. Andererseits wurden mithilfe der zeilenweise kumulierten Einflussstärken auch jene Parameter aus der Einflussmatrix ermittelt, die auf *mehrere* gewünschte Zielgrößen einen funktionsbestimmenden Einfluss haben.

Nachfolgend wird dazu jeweils ein Anwendungsbeispiel beschrieben:

Szenario 1: Seitenbogengängigkeit verbessern

Zur Verbesserung der Seitenbogengängigkeit einer rückensteifen Antriebskette⁷³⁸ (blau markiert in Abbildung 5.17) werden in der betreffenden Spalte die hervorgehobenen Einflussgrößen ausgewählt. Entsprechend der „+/-“-Kennzeichnung kommt als Gestaltungsvorschlag sowohl ein erhöhtes Montagemaß zwischen den Außenlaschen als auch eine verringerte Dicke der Innen- und Außenlaschen der Kette in Frage. Im vorliegenden Fall begünstigen sich beide Gestaltungsideen gegenseitig, da bei einer verringerten Laschendicke das Montagemaß zwischen den Außenlaschen automatisch ansteigt, sofern die Länge der Bolzen unverändert belassen wird.⁷³⁹

Bei der *Tragweitenanalyse* ist festzustellen, dass durch diese Variationen voraussichtlich nicht nur die Verspannung der Kettenglieder unter Belastung reduziert und die übertragbare Druckkraft absinken wird; auch die Rückensteifigkeit der Kette wird dadurch voraussichtlich herabgesetzt werden. Dies zeigt deutlich das Spannungsfeld aus Zielkonflikten auf, in dem Konstruktionsvorschläge entwickelt

⁷³⁶ vgl. Kapitel 2.5.4

⁷³⁷ vgl. Kapitel 5.3.3

⁷³⁸ vgl. Tian 2011 S.82ff. (betreute Abschlussarbeit)

⁷³⁹ Bei der Interpretation der Einflussmatrix ist darauf zu achten, dass die dargestellten Zahlenwerte nicht die tatsächlichen Einflussstärken wiedergeben; Eine derartige Abschätzung ist auf Erfahrungsbasis mit den zugrunde liegenden Modellen nicht möglich, sondern muss anhand von Versuchen oder Simulationen beurteilt werden.

Gewichtung der Beziehungen: Faktor 0,5 innerhalb einer Ebene, 1 zwischen den Ebenen

Funktions- eigenschaften		1.1			1.2		1.3			1.4		1.5		Kumulierte relative Einflussstärke auf die Rückensteifigkeit			
		Seitenbogen- gängigkeit	Durchhang der Kette		Durchhang der Kette	Spannung der Kettenglieder	max. übertragbare Durchkraft ohne Knicken	Torsion der Kettenglieder									
Prozess- und Konstruktionsparameter		3	2	3	2	3	3	4	15								
3.1	WFP 2.1/2/3/4	0,75				0,25		0,25		0,25		0,25					
	Innenseite	4,9%				1,7%						0,25					
3.2	WFP 2.11, 2.12	0,75				0,25		0,25		0,25		0,25					
	Außenseite	4,9%				1,7%						0,25					
3.3	WFP 2.11, 2.12	0,75				0,25		0,25		0,25		0,25					
	erhöhen	4,9%				1,7%						0,25					
3.4	LSS 2.2, 2.3	3,5				1,5		10,2%		6,7%		2,5					
	verringern	23,0%				10,2%						2,5					
3.5	WFP 2.14, 2.15	2			1,5	18,8%		16,9%		10,0%		2,5					
	erhöhen	13,1%			1,5	18,8%		16,9%		10,0%		2,5					
3.6	LSS 2.1/2/4/5	1			2,5	31,3%		16,9%		16,7%		2,5					
	verringern	6,6%			2,5	31,3%		16,9%		16,7%		2,5					
3.7	WFP 2.1/2/3/4	1			1	12,5%		13,6%		20,0%		3					
	C-Form	6,6%			1	12,5%		13,6%		20,0%		3					
3.8	LSS 2.1/2/4/5				1	12,5%		13,6%		13,3%		2					
	erhöhen				1	12,5%		13,6%		13,3%		2					
3.9	WFP 2.1/2/3/4	3,5						10,2%		6,7%		2,5					
	verringern	23,0%						10,2%		6,7%		2,5					
3.10	WFP 2.1/2/3/4	1								6,7%		1					
	feiner	6,6%								6,7%		1					
3.11	WFP 2.1/2/3/4	1								6,7%		1					
	größer	6,6%								6,7%		1					
3.12	WFP 1.4, 1.5				1	12,5%		6,8%		6,7%		1					
	erhöhen				1	12,5%		6,8%		6,7%		1					
3.13	WFP 3.1, 3.2				1	12,5%		6,8%		6,7%		1					
	verringern				1	12,5%		6,8%		6,7%		1					

Abbildung 5.17: Auswahl funktionsbestimmender Gestalteeigenschaften zur Verbesserung von Funktions- und Zustandseigenschaften einer rückensteifen Antriebskette (Fallstudie I)⁷³⁸

werden. Die Aufgabe von Konstrukteuren ist es, die Tragweite ihrer Gestaltungsideen mit allen beteiligten Fachbereichen abzustimmen. Dabei ist es vorteilhaft, nicht nur einzelne Gestaltungsideen zu fokussieren, sondern einen Lösungsraum zu eröffnen, in dem sowohl deduktive als auch assoziative Gestaltungsideen kritisch diskutiert und abgewogen werden.

Eine Auflösung von Zielkonflikten ist immer auch möglich, indem Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen hinzugefügt oder Abhängigkeiten zwischen Funktionen mittels Separation der funktionsbestimmenden Wirkorte gelöst werden.⁷⁴⁰ Anregungen dazu liefert die Methode „Variation der Gestalt“,⁷⁴¹ wobei Wirkprinzipien durch freie Assoziationen verändert werden. Nach Auflösung der Zielkonflikte wird anschließend angestrebt, die Funktionen und Funktionseigenschaften unabhängig voneinander zu verbessern. Dazu kann wiederum das in dieser Arbeit beschriebene Vorgehen zur Analyse der relevanten Wirkzusammenhänge⁷⁴² angewendet werden.

Szenario 2: Rückensteifigkeit verbessern

In ähnlicher Weise können Gestaltungsideen zur Verbesserung der Rückensteifigkeit der Antriebskette abgeleitet werden. Dies war das erklärte Ziel des Konstruktionsprojekts in Fallstudie I.⁷⁴³ Hierzu werden aus der rechten Spalte der Einflussmatrix diejenigen Konstruktionsparameter mit der größten kumulierten Einflussstärke auf die Rückensteifigkeit ausgewählt (orange markiert in Abbildung 5.17). Entsprechend der „+/-“-Kennzeichnung am rechten Matrixrand ist zu erwarten, dass

- ein verringertes Montagemaß zwischen der Außenlaschen der Kette
- ein erhöhtes Schultermaß der Innen- und Außenlaschen, sowie
- eine erhöhte Dicke der Laschen an den Wirkflächenpaaren 2.1, 2.2, 2.3 & 2.4

die größte relative Einflussstärke auf die Rückensteifigkeit aufweisen. In jedem Fall würde dadurch die Seitenbogengängigkeit der Kette reduziert, wohingegen die übertragbare Last unter Druckbeanspruchung gesteigert werden kann.

Abhängig vom Änderungsaufwand, der durch diese Gestaltungsideen in der Konstruktion, Produktion und Montage der Antriebskette resultiert, können auch andere Gestaltungsideen ausgewählt und erprobt werden. In Fallstudie I wurden beispielsweise neben dem „Montagemaß“ auch das „Schultermaß“, die „Geometrie der Laschen-Auflagen“ und die „Höhe der Laschen über der Bohrung“ angepasst.⁷⁴⁴ Daraus resultierte ein technischer Entwurf, der in Versuchen erprobt und nach

⁷⁴⁰ vgl. Ohmer 2008 S.37ff.; Lemburg 2009 92ff.

⁷⁴¹ vgl. Ehrlenspiel 2009 S.440ff.

⁷⁴² siehe Kapitel 5.1.2 ff.

⁷⁴³ vgl. Tian 2011 S.31 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁴⁴ vgl. Tian 2011 S.84ff. (betreute Abschlussarbeit)

weiteren iterativen Entwicklungsschritten umgesetzt werden konnte (Abbildung 5.18).⁷⁴⁵ Ein Jahr nach Abschluss der Fallstudie⁷⁴⁶ wurde die Rückensteife Kette von den Lesern der Zeitschrift KEM zum "Produkt des Jahres" 2011 gewählt.⁷⁴⁷

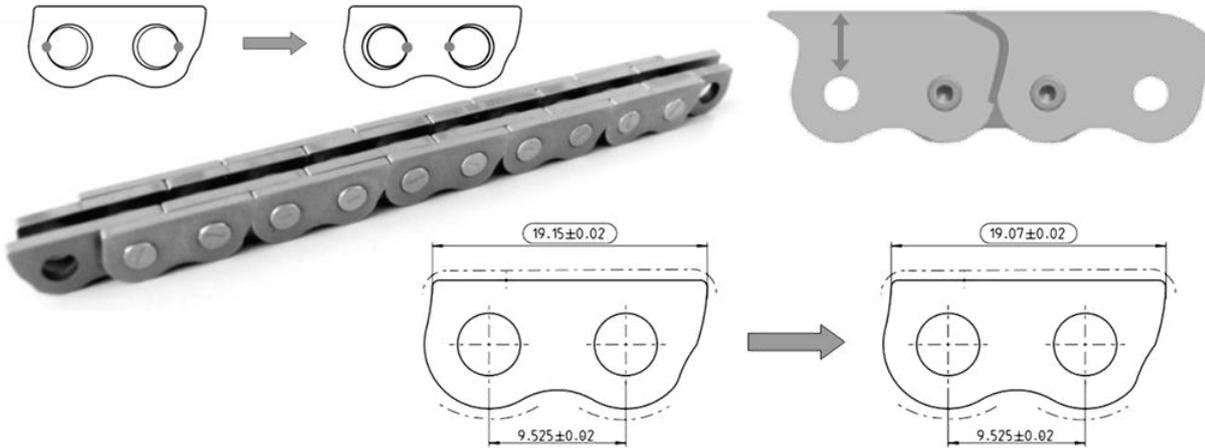


Abbildung 5.18: Prototypisches Lösungskonzept einer rückensteifen Antriebskette aus Fallstudie I ⁷⁴⁵

5.4.2 Fallstudie III: Einschraubzeit einer Blechbohrschraube verbessern

Zum Ende des Kapitel 5.3.3 wurde eine Cluster-Matrix vorgestellt, die aus mehreren Cluster-Trend-Modellen zusammengesetzt ist. Sie erleichtert eine visuelle Bestimmung multivariater Wirkzusammenhänge, aus denen Rückschlüsse auf Gestaltungsideen gezogen werden können. Diese Gestaltungsideen sollten für jene Gestalt- und Prozessparameter abgeleitet werden, die in der Einflussmatrix eine möglichst ausgeprägte (lineare oder exponentielle) Häufigkeitsverteilung bei mehreren Funktionseigenschaften aufweisen.

Aus der Intervallabgrenzung der einzelnen Cluster können Rückschlüsse darüber gezogen werden, wie die Ausprägung einer Einflussgröße gewählt werden sollte. In Fallstudie III wurde beispielsweise ermittelt, dass 61 % der Schrauben, deren Spitzenlänge in Cluster 1 zugeordnet waren, eine Einschraubzeit $t < X$ Sekunden aufwiesen (Abbildung 5.11). Für Cluster 2 und 3 (abnehmende Spitzenlänge) wurde mit einer linearen Tendenz eine größere Einschraubzeit gemessen. Diese Erkenntnis legt nahe, dass

- es sich bei der Länge der Schraubenspitze um eine funktionsrelevante Gestalteigenschaft handeln könnte und

⁷⁴⁵ vgl. Tian 2011 S.86f. (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁴⁶ siehe Abbildung 4.2 in 4.1.3

⁷⁴⁷ vgl. KEM 2012 S.8

- dass die Spitzenlänge für eine zukünftige Produktgeneration daher so gewählt werden sollte, dass sie die mindestens dem Intervall- bzw. Toleranzbereich aus Cluster 1 entspricht.

Weitere funktionsbestimmende Konstruktionsparameter und Gestaltungsideen zur Verbesserung der Einschraubzeit wurden durch Auswertung der in Abbildung 5.16 dargestellten Einflussmatrix ermittelt. Sie wurden dazu genutzt, um Fertigungstoleranzen in den Produktionsprozessen der Schrauben gezielt zu definieren, sodass eine gleichbleibend hohe Qualität der Funktionserfüllung bei gesteigerten Leistungsanforderungen (sichere Fixierung von 67% dickeren Blechen bei einer um 33% reduzierten Anpresskraft der Anwender) erfüllt werden kann.

5.4.3 Fallstudie VI: Sicht aus dem Cockpit auf die Straße verbessern

Zu Beginn des Kapitel 5.3.3 wurde erläutert, wie mithilfe von Einflussmatrizen Hypothesen über funktionsbestimmende Einflussgrößen gebildet werden können. Daraus können unmittelbar Gestaltungsideen für solche Gestalt- oder Prozessparameter entwickelt werden, die einen geringen Vernetzungsgrad und eine große Einflussstärke aufweisen.

In Fallstudie VI, die durch Abbildung 5.14 illustriert wird, bietet sich eine Änderung der „Wölbung des Lenkrads“ an. Daraus können mehrere Gestaltungsideen abgeleitet werden, darunter eine Reduktion des Lenkrad-Radius, eine abgeflachte Konturlinie im oberen Lenkradbereich oder auch eine grundsätzliche Absenkung der Lenkradposition, um das Sichtfeld zu vergrößern und die Sicht auf das Head-Up-Display zu verbessern.

Ein tragfähiges Lösungskonzept ergab sich in Fallstudie VI – wie in vielen Fällen – erst aus einer Kombination von mehreren Gestaltungsideen. Dementsprechend wurden neben der Lenkrad-Wölbung noch weitere Gestalt- und Prozessparameter in die Synthese miteinbezogen, um die vorhandenen Verbesserungspotenziale möglichst gut ausschöpfen zu können. Die ermittelten Gestaltungsideen wurden zudem einer sorgfältigen Tragweitenanalyse unterzogen. Hierzu kam die von WEBER und KÖHLER vorgeschlagene Matrix-CPM-Darstellung⁷⁴⁸ zum Einsatz, um Änderungsaufwände und unbeabsichtigte Auswirkungen auf sekundäre Funktionseigenschaften zu überprüfen.

Die Anwendung der CPM-Matrix wurde von den begleiteten Entwicklungsingenieuren als nutzenstiftend eingeschätzt – insbesondere bei der Unterstützung von Entscheidungssituationen, in denen Änderungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Tragweite für alle betroffene Baugruppen bewertet werden sollen. Ebenso wurde

⁷⁴⁸ vgl. Kapitel 2.5.4; vgl. Köhler 2009

positiv hervorgehoben, dass die Zusammenhänge zwischen Funktionen bzw. Funktionseigenschaften und der Produktgestalt transparent dargestellt werden. *„Durch eine kontinuierliche Fortführung vom Vorgängermodell zu seinem Nachfolger können die im vorausgegangenen Entwicklungsprozess gesammelten Erfahrungen direkt im neuen Entwicklungsprozess angewandt werden, ohne Zusammenhänge zu vergessen. Damit trägt dieses Modell maßgeblich zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Fahrzeugkonstruktion bei, da Knowhow zwischen den Entwicklungsphasen nicht verloren gehen kann.“*⁷⁴⁹ Durch die Qualität der methodisch erarbeiteten Ergebnisse wurde eine fortgesetzte Verwendung der – bis dahin erstmalig angewendeten Modellierungstechnik – auch in anderen Teilprojekten der Gesamtfahrzeugkonstruktion angestrebt.

In Fallstudie VI wurde durch eine Kombination von mehreren Gestaltungsideen in Summe eine Vergrößerung der Sichtfläche durch die Windschutzscheibe um bis zu 9% und eine Homogenisierung des Sichtfeldrands um bis zu 49% erreicht.⁷⁵⁰ Im Vergleich zu Wettbewerbsprodukten wurde dadurch ein Alleinstellungsmerkmal erarbeitet, das nach Angaben der Entwickler *„neue Maßstäbe“* im entsprechenden Fahrzeugsegment setzt.⁷⁵¹ Eine Umsetzung der Gestaltungsideen war zum Abschluss der Fallstudie für das kommende Facelift des Fahrzeugs vorgesehen.

⁷⁴⁹ vgl. Kubel 2013 S.112 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁵⁰ Die Werte variieren je nach Insassenkollektiv. Vgl. Kubel 2013 S.109 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁵¹ vgl. Kubel 2013 S.111 (betreute Abschlussarbeit)

6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

In den vorangehenden Kapiteln wurden eine Vorgehenssystematik und ausgewählte Modellierungstechniken vorgestellt, die bei der Funktionsanalyse und der deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen eine methodische Unterstützung bieten sollen. Sie wurden in acht Konstruktionsprojekten, die als empirische Fallstudien begleitet wurden,⁷⁵² erprobt. In den nachfolgenden Teilkapiteln werden die Erkenntnisse aus diesen Fallstudien vorgestellt.

6.1 Erkenntnisse aus der Anwendung in der Entwicklungspraxis

Die Ausgangssituationen in den acht begleiteten Fallstudien ist durch eine klassische Problemstellung der Produktgenerationsentwicklung charakterisiert: Ausgehend von einem Referenzprodukt⁷⁵³ sollten die Potenziale der bestehenden Lösungsprinzipien hinsichtlich Steigerung der Leistungsfähigkeit und der Qualität der Funktionserfüllung durch gezielte Gestaltvariationen besser ausgeschöpft werden. Das Ziel war die Entwicklung von Gestaltungsideen für eine neue Produktgeneration, die genügend Differenzierungsmerkmale aufweist, um als echte Innovation am Markt erfolgreich zu sein. Vor diesem Hintergrund es den beteiligten Entwicklungsingenieuren ein Bedürfnis, die Funktionsweise des jeweiligen Referenzprodukts besser zu verstehen. Zu diesem Zweck wurden zunächst qualitative Modellierungstechniken eingesetzt, um Hypothesen über Wirkzusammenhänge und funktionsrelevante Gestalt- und Prozessparameter zu bilden. Eine quantitative Modellbildung war erforderlich, um die getroffenen Annahmen über Wirkzusammenhänge vergleichend bewerten und so für die nachfolgenden Gestaltsyntheseschritte die funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter bestimmen zu können. Im Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit standen daher Untersuchungen zu Modellierungstechniken, die eine quantifizierte Funktionsanalyse unterstützen.

Durch diesen Forschungsfokus nahm die (Weiter-)Entwicklung und Anwendung der in Kapitel 5.2 bis 5.4 vorgestellten Modellierungstechniken eine zentrale Position im Aktivitäten-Spektrum der begleiteten Entwicklungsprojekte ein. Dabei brachten sowohl der Autor als auch die beteiligten Konstrukteure neue Ideen zur Erweiterung der etablierten qualitativen Modellierungstechniken⁷⁵⁴ ein, um funktionsrelevante Wirkzusammenhänge zu bestimmen und zu quantifizieren. Im Verlauf der ersten drei

⁷⁵² siehe Kapitel 4.1

⁷⁵³ Hierbei handelte es sich mit Ausnahme von Fallstudie IV jeweils um das Vorgängerprodukt; in Fallstudie IV war es ein Funktionsprototyp aus einem extern durchgeführten Vorentwicklungsprojekt.

⁷⁵⁴ siehe Kapitel 5.2

Fallstudien wurden auf diese Weise die Einflusspfadanalyse, die Cluster-Trend-Analyse und die Einflussmatrixanalyse entwickelt. In den nachfolgenden Fallstudien wurden die Modellierungstechniken in neuen Anwendungsfällen erprobt und weiterentwickelt.

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Reifegrad der drei Modellierungstechniken vorgestellt, der bis zum Abschluss der acht Fallstudien erarbeitet und erprobt wurde. Im nachfolgenden Teilkapitel werden die methodischen Ergebnisse der Fallstudien und die Bewertungen der beteiligten Konstrukteure zusammengefasst.

6.1.1 Bezug zu den Barrieren der induktiv-deduktiven Funktionsanalyse

In Kapitel 4.2 wurden drei Barrieren vorgestellt, die eine induktiv-deduktive Funktionsanalyse und Synthese von Gestaltungsideen erschweren. In den begleiteten Entwicklungsprojekten äußerten sich die Funktions-, die Beobachtungs- und die Induktionsbarriere dahingehend, dass den Konstrukteuren die methodische Vorgehensweise zur deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen sowohl auf empirischer als auch auf theoretischer Seite (Beobachtung der Referenzprodukte und Modellbildung) unklar war. Sie äußerten z. B. die nachfolgend sinngemäß wiedergegebenen Fragen:⁷⁵⁵

- Wie können mess- oder beobachtbare Zielgrößen für die vorgegebenen, abstrakten Funktionen und Eigenschaften bestimmt werden?
- Wie können die funktionsrelevanten und konstruktiv beeinflussbaren Einflussgrößen bestimmt und bewertet werden, um die Stellgrößen für die Konstruktion zu ermitteln?

In Abbildung 6.1 sind die Funktions-, die Beobachtungs- und die Induktionsbarriere in die Vorgehenssystematik aus Kapitel 5.1 eingeordnet. Sie werden jeweils (bildlich gesprochen) als Barriere bei der Modellbildung und bei der empirischen Datenerhebung interpretiert. Sie betreffen damit jene Tätigkeiten, die für eine zielgerichtete und auf Systemverständnis beruhende Entwicklung von Gestaltungsideen notwendig sind.⁷⁵⁶ Die Empfehlungen zur Modellbildung in dieser Arbeit sollen dazu beitragen, diese Barrieren zu überwinden. Sie adressieren

⁷⁵⁵ vgl. Tian 2011, Stürtzel 2012, Kubel 2013, Gaede 2013, Wall 2014 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁵⁶ Diese Lücke wird in Abbildung 6.1 symbolisch als Unterbrechung der Pfeile dargestellt, die „empirische Beobachtungen“ und „theoretische Modellbildung“ miteinander verbinden. Die Pfeile repräsentieren in diesem Zusammenhang ein systematisches Vorgehen auf den Ebenen der Theorie und der Empirie, z. B. für das Teilproblem „Funktionsbestimmende Einflussgrößen ermitteln“. Je stärker die Methodenkompetenz der beteiligten Entwicklungsingenieure ausgeprägt war, desto weniger stark ausgeprägt wurden die jeweiligen Barrieren wahrgenommen.

- die *Funktionsbarriere*, die durch eine Unsicherheit im expliziten Umgang mit Funktionsbeschreibungen charakterisiert ist,⁷⁵⁷ sowie
- die *Induktionsbarriere*, die durch eine hohe Komplexität multivariater Wirkzusammenhänge charakterisiert ist und zusätzlich verstärkt wird durch die Beschränkung der konstruktionsmethodischen Modellierungstechniken auf eine qualitative Funktionsanalyse.⁷⁵⁸

Zur Überwindung der *Beobachtungsbarriere* sei an dieser Stelle auf die von THAU beschriebenen „Heuristiken zur Modellbildung“⁷⁵⁹ verwiesen, die als methodische Hilfsmittel in die Vorgehenssystematik in Abbildung 5.3 integriert sind. Sie wurden in den begleiteten Entwicklungsprojekten der Fallstudien III, V und VIII angewendet und haben sich dahingehend bewährt, dass sie den beteiligten Entwicklungsingenieuren Tipps und Hilfestellungen zur vertieften Funktionsanalyse gaben.

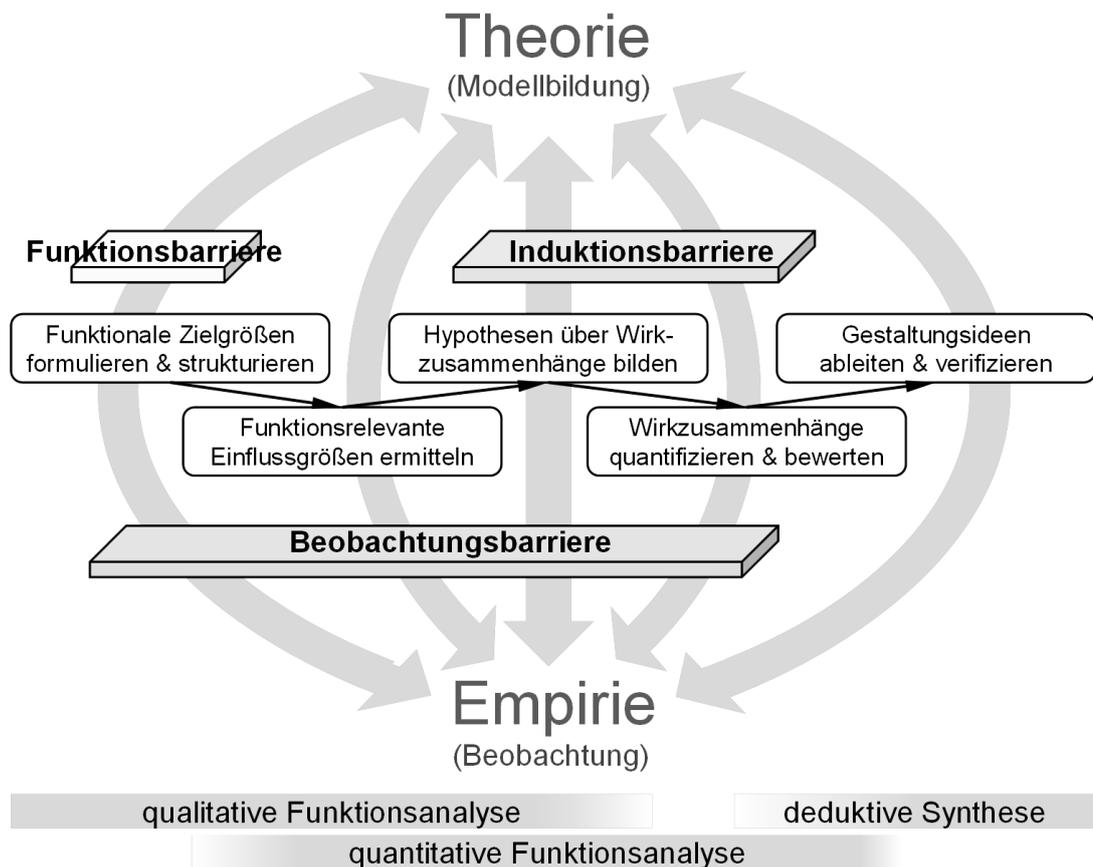


Abbildung 6.1: Einordnung der Funktionsbarriere, der Induktionsbarriere und der Beobachtungsbarriere in den Kontext der vorgeschlagenen Vorgehenssystematik

⁷⁵⁷ siehe Kapitel 4.2.1

⁷⁵⁸ siehe Kapitel 4.2.3

⁷⁵⁹ vgl. Thau 2013 S.103ff.

Als Hilfsmittel gegen die *Funktionsbarriere* wurden in den begleiteten Entwicklungsprojekten die in Kapitel 5.2 empfohlenen Modellierungstechniken für eine qualitative Funktionsanalyse eingesetzt. Beispielsweise wurden die Entwicklungsteams der Fallstudien I, II, III, V, VII und VIII gebeten, eine Modellbildung mit dem *Contact and Channel Ansatz (C&C²-A)*⁷⁶⁰ durchzuführen. Ziel war es, die subjektive Mehrdeutigkeit bei der Zuordnung von Funktionen und Funktionseigenschaften zu der Gestalt der Referenzprodukte durch eine formalisierte Modellierungstechnik zu überwinden.

Die Verwendung von „Wirkflächenpaaren“ und „Leitstützstrukturen“ als gemeinsame Sprachbasis und als methodischer Leitfaden bei der Funktionsanalyse führte nach Angaben der beteiligten Konstrukteure zu einer Fokussierung der Diskussionen auf die funktionsrelevanten Wirk-Strukturen und Wirkprinzipien der Referenzprodukte.⁷⁶¹ Dadurch konnte nicht nur ein konkreteres Verständnis der funktionalen Zielgrößen, sondern auch erste Erkenntnisse über die relevanten Gestalt- und Prozessparameter erarbeitet werden. Die subjektive Unsicherheit im Umgang mit dem Funktionsbegriff wurde durch die Formalisierung der Modellbildung und den Bezug der Funktionsbeschreibung zur Gestalt des jeweiligen Referenzsystems soweit reduziert, dass erste qualitative Hypothesen über funktionsbestimmende Wirkzusammenhänge formuliert werden konnten.⁷⁶² Abbildung 6.2 zeigt exemplarisch ein Modell aus Fallstudie I, mit dem die Funktionen und die Wirkorte des untersuchten Referenzsystems analysiert wurden. Weitere Beispiele für Modelle, die zum Zweck einer qualitativen Funktionsanalyse gebildet wurden, sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Teilfunktion 1.2

Bolzen am Auslauf des Kettenbahnhofs: Druckkraft von Kettenrad auf Innenlasche übertragen		
WFP 0.2	LSS 3.1	WFP 2.5, WFP 2.6

Teilfunktion 1.3

Bolzen am Auslauf des Kettenbahnhofs: Druckkraft von Kettenrad auf Außenlasche übertragen		
WFP 0.2	LSS 3.1	WFP 2.11, WFP 2.12

Teilfunktion 1.4

Führungsschiene: Bewegungsrichtung der Kette am Auslauf des Kettenbahnhofs einschränken		
WFP 3.1	LSS 3.2	WFP 3.2, WFP 3.3

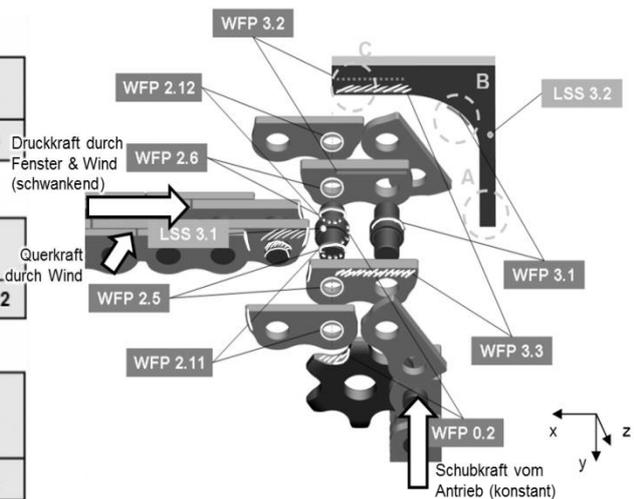


Abbildung 6.2: Formulierung von Funktionen und Verknüpfung mit Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen einer rückensteifen Antriebskette (Fallstudie I)⁷⁶³

⁷⁶⁰ siehe Kapitel 2.3.3 und 5.2.3

⁷⁶¹ vgl. Leiser 2011 S.56; Herzog 2012 S.47; Stemmler 2013 S.75 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁶² siehe Kapitel 4.2.3

⁷⁶³ Tian 2011 S.48 (betreute Abschlussarbeit)

Als Hilfsmittel gegen die *Induktionsbarriere* wurden in den begleiteten Entwicklungsprojekten jeweils die in Kapitel 5.3 und 5.4 empfohlenen Modellierungstechniken eingesetzt. Als Ziel wurde dabei die methodische Unterstützung einer quantitativen Funktionsanalyse und einer deduktiven Synthese von Gestaltungsideen angestrebt. Die Grundlagen für eine quantitative Funktionsanalyse wurden in den Fallstudien I, II, III, V und VII bereits im Vorfeld durch eine qualitative Modellbildung mit dem Contact and Channel Approach gelegt.⁷⁶⁴ Je nachdem, ob Versuche und Simulationsexperimente durchgeführt werden konnten oder nur qualitative Informationen aus Literaturrecherchen und Expertengesprächen verfügbar waren, schloss sich daran eine Cluster-Trend-Analyse⁷⁶⁵ oder eine Einflusspfadanalyse⁷⁶⁶ an. Der Zweck dieser Modellbildung war es,

- die verfügbaren Informationen über den Zusammenhang von Funktion und Gestalt zu konsolidieren,
- eine Übersicht über die funktionsrelevanten Abhängigkeits- und Einflussbeziehungen herzustellen und
- weitere Hypothesen über funktionsbestimmende Wirkzusammenhänge zu formulieren.

In Abbildung 6.3 sind exemplarisch drei typische Abfolgen der verwendeten Modellierungstechniken aus den begleiteten Entwicklungsprojekten dargestellt. Die Auswahl der verwendeten Methoden richtete sich primär nach der Art der Daten, die zur Bestimmung und Auswertung von Wirkzusammenhängen zur Verfügung standen:

In Fallstudie I und VIII konnten lediglich nominal- und ordinalskalierte Daten⁷⁶⁷ aus Recherchen und Experteneinschätzungen erhoben werden. Sie wurden mithilfe einer Einflusspfadanalyse strukturiert und mithilfe einer Einflussmatrixanalyse ausgewertet.⁷⁶⁸ Die Gestaltungsideen, die daraus deduktiv abgeleitet wurden, sind exemplarisch in Kapitel 5.4.1 beschrieben.

In den Fallstudien III und V konnten anhand von Prüfstandsversuchen mit den bereitgestellten Referenzprodukten umfangreiche Messdaten ermittelt werden.⁷⁶⁹ Zur Datenauswertung wurden zunächst Cluster-Trend-Modelle und eine Cluster-Matrix-Analyse eingesetzt.⁷⁷⁰ Zu Verifikationszwecken wurden zwei statistische

⁷⁶⁴ Durch die Modellbildung mit dem Contact and Channel Approach waren zu Beginn der quantitativen Funktionsanalyse bereits eine Vielzahl vermeintlich funktionsrelevanter Gestalt- und Prozessparameter ermittelt worden.

⁷⁶⁵ siehe Kapitel 5.3.2

⁷⁶⁶ siehe Kapitel 5.3.1

⁷⁶⁷ siehe Tabelle 2-3 in Kapitel 2.4.2

⁷⁶⁸ vgl. Tian 2011, Wall 2014 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁶⁹ vgl. Stürtzel 2012, Stemmler 2013 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁷⁰ siehe Kapitel 5.3.2 und 5.3.3

Analyseverfahren (Korrelations- und Regressionsanalysen) angewendet.⁷⁷¹ Die mit den Entwicklungsmethoden erzielten Ergebnisse der wurden dabei insofern bestätigt, als dass dieselben funktionsbestimmenden Einflussgrößen ermittelt wurden. Für weitere Einflussfaktoren, die mithilfe der Cluster-Trend- und der Cluster-Matrix-Analyse als funktionsrelevant eingestuft wurden, konnten keine signifikanten statistischen Korrelationen ermittelt werden.

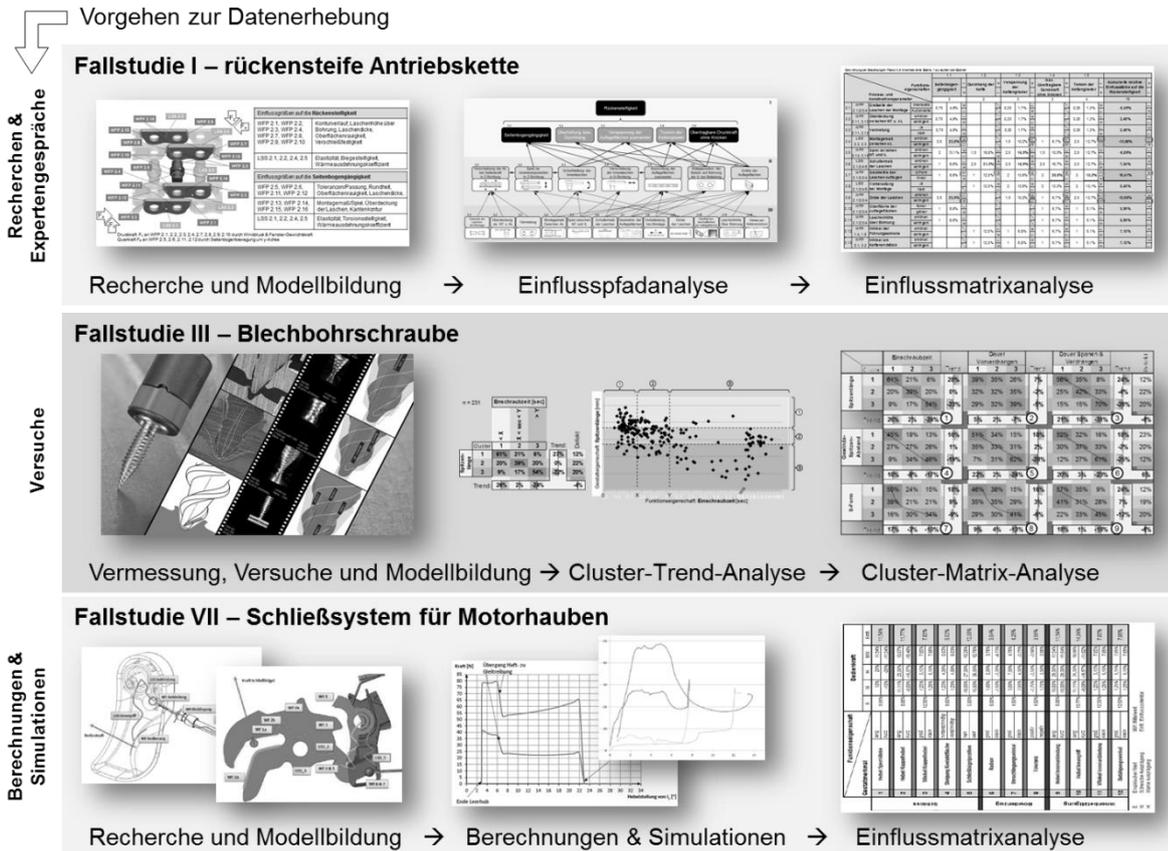


Abbildung 6.3: Verwendete Modellierungstechniken zur Bestimmung und Auswertung von Wirkzusammenhängen in Abhängigkeit von den Methoden der Datenerhebung

In den Fallstudien II, VI und VII standen ausschließlich Berechnungs- und Simulationsexperimente für eine empirische Datenerhebung zur Verfügung.⁷⁷² Sie wurden dazu verwendet, die Auswirkungen einer inkrementellen Variation von Gestalt- und Prozessparametern auf einzelne Zustands- und Funktionseigenschaften zu prognostizieren. Die Auswertung der Simulationsdaten verlief analog zu einer Cluster-Trend-Analyse, d. h. die Kennlinienverläufe wurden zunächst in mehrere charakteristische Bereiche unterteilt. Die (Mittel-)Werte der einzelnen Bereiche wurden in eine Einflussmatrix überführt. Auf diese Weise war es möglich, die

⁷⁷¹ vgl. Stürtzel 2012 S.58ff., Stemmler 2013 S.36, Dammert 2014 S.52ff. (betreute Abschlussarbeiten)
⁷⁷² vgl. Leiser 2012, Kubel 2013, Gaede 2013 (betreute Abschlussarbeiten)

Auswirkungen der Variation eines Gestalt- oder Prozessparameters auf mehrere Zustands- und Funktionseigenschaften in einer gemeinsamen Übersichtsdarstellung zu vergleichen. Die Gestaltungsideen, die daraus deduktiv abgeleitet wurden, sind exemplarisch in Kapitel 5.4.3 beschrieben.

6.1.2 Bewertung der Modellierungstechniken durch die Anwender

Zum Abschluss der begleiteten Fallstudien wurden die beteiligten Entwicklungsingenieure jeweils gebeten, Stellung zu nehmen zu ihren Erfahrungen bei der Anwendung der vorgeschlagenen Vorgehenssystematik und besonders zum Arbeiten mit den vorgeschlagenen Methoden und Modellierungstechniken. Dies erfolgte nicht quantitativ mit einem standardisierten Fragebogen, sondern qualitativ in semistrukturierten Gesprächen. Die gewählte Form der Befragung ist nach Ansicht des Autors der richtige Weg, um die subjektiven Erfahrungen der beteiligten Entwicklungsingenieure (auch zwischen den Zeilen) besser verstehen zu können – z. B. indem ein Gespräch jeweils individuell auf konkrete Beispielsituationen vertieft werden konnte. Die Inhalte der Gespräche orientierten sich einerseits an den verwendeten Methoden und andererseits an den individuellen Herausforderungen im Projektverlauf, z. B. hinsichtlich der Problematik der Datenerhebung und der Datenauswertung zur Quantifizierung von Wirkzusammenhängen.⁷⁷³ Nachfolgend wird eine Auswertung der wichtigsten Erkenntnisse vorgestellt. Spezifische Bewertungen aus den einzelnen Fallstudien können in der jeweils angegebenen Literatur nachgelesen werden.

Die Beurteilung der Modellierungstechniken durch die beteiligten Konstrukteure erfolgte jeweils im subjektiven Vergleich zu ihren etablierten Denk- und Handlungsstrategien. Ihr Referenzvorgehen für eine systematische *Funktionsanalyse* war typischerweise dadurch charakterisiert, dass die Informationen, die sie in Recherchen und Versuchen gesammelt hatten, in Diagrammen, Tabellen, Skizzen und Notizen dokumentiert wurden.⁷⁷⁴ Eine Auswertung dieser Informationen erfolgte üblicherweise durch eine vergleichende Interpretation dieser Modelle. Das Referenzvorgehen für die *Synthese von Gestaltungsideen* ist geprägt von einer assoziativen Lösungsfindung, bei der sowohl Erfahrungswerte als auch Kreativitätstechniken zum Einsatz kommen.

Ein Mehrwert der vorgeschlagenen Modellierungstechniken zeigt sich nach Aussage der beteiligten Konstrukteure vor allem bei der Funktionsanalyse. Die empfohlenen qualitativen und quantitativen Modellierungstechniken förderten eine systematische und strukturierte Vorgehensweise, indem sie nicht nur dazu anregen, die

⁷⁷³ siehe Kapitel 4.2.2 „Beobachtungsbarriere“

⁷⁷⁴ siehe Abbildung 4.3 in Kapitel 4.1.3; vgl. Leiser 2011 S.54 (betreute Abschlussarbeit)

funktionsrelevanten Wirkorte und Wirkbewegungen der Referenzprodukte zu bestimmen (qualitative Funktionsanalyse). Sie leiteten auch dazu an, die relative Einflussstärke der Gestalt- und Prozessparameter auf die Qualität der Funktionserfüllung zu hinterfragen (quantitative Funktionsanalyse).⁷⁷⁵ Diese quantitative Funktionsanalyse fördere ein vertieftes Systemverständnis und dadurch auch die Fähigkeit zur gezielten Synthese von Gestaltungsideen.⁷⁷⁶

Neben dem Erfahrungsgewinn der beteiligten Entwicklungsingenieure wurde auch die Dokumentation der Zusammenhänge von Funktion und Gestalt als besonders positiv beurteilt. Sie stellt ein besonders wichtiges, strategisches Element der Produktgenerationsentwicklung dar. Die Modellbildung unterstütze die entwicklungsbegleitende Erstellung einer umfangreichen Informationsbasis über Wirkzusammenhänge und funktionsrelevante Konstruktionsparameter, die in nachfolgenden Projekten wieder aufgegriffen werden kann.⁷⁷⁷ Die Modelle der quantitativen Funktionsanalyse wurden in den Fallstudien auch als Kommunikations- und Argumentationsgrundlage eingesetzt, um bei Zielkonflikten zu nachvollziehbar begründeten (und transparent dokumentierten) Entscheidungen beizutragen.⁷⁷⁸

Einen weiteren Mehrwert sehen die beteiligten Konstrukteure in der durchgängigen Methodenunterstützung der in Kapitel 5.1 vorgestellten Vorgehenssystematik. Sie liefert eine Übersicht über die verfügbaren konstruktionsmethodischen Ansätze zur Funktionsanalyse⁷⁷⁹ und erweitert deren Anwendungsbereich mit der *Einflusspfad*-, der *Cluster-Trend*- und der *Einflussmatrixanalyse* auf jene Problemstellungen, die nicht nur eine qualitative, sondern auch eine quantitative Funktionsanalyse erforderlich machen.

Weitere Stärken dieser drei Modellierungstechniken liegen nach Einschätzung der beteiligten Konstrukteure

- in der *übersichtlichen Darstellung komplexer Wirkzusammenhänge* in Einflusspfaddiagrammen und Einflussmatrizen. In den Fallstudien konnten damit sowohl direkte als auch indirekte Wirkzusammenhänge ermittelt werden, die durch das Referenzvorgehen der Konstrukteure (eine vergleichende Interpretation von einzelnen Diagrammen, Tabellen und Notizen) nicht unmittelbar ersichtlich waren (siehe Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16).
- in der *Simplizität* der quantifizierten Modellierung von Wirkzusammenhängen. Sie trägt dazu bei, dass funktionsbestimmende Einflussgrößen auch in

⁷⁷⁵ „Oft macht man sich über die funktionsrelevanten Gestalteigenschaften erst Gedanken, wenn man die Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen einzeichnet.“ (Aussage eines Konstrukteurs aus Fallstudie I)

⁷⁷⁶ vgl. Tian 2011 S.88, vgl. Stürtzel 2012 S.91 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁷⁷ vgl. Leiser 2011 S.43 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁷⁸ vgl. Kubel 2013 S.112 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁷⁹ siehe Abbildung 5.3 in Kapitel 5.2.5

solchen Fällen identifizierbar sind, in denen Methoden der statistischen Versuchsplanung nicht oder nur eingeschränkt angewendet werden können.⁷⁸⁰

- in der *Einbindung unterschiedlicher Informationsquellen* in die Funktionsanalyse, sodass funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter sowohl durch Auswertung von Messdaten als auch durch Abschätzung aus Erfahrungswerten ermittelt werden können.⁷⁸¹
- in der *Nutzung gängiger Werkzeuge* der Konstruktionspraxis zur Modellbildung.⁷⁸² In den Fallstudien wurden ausschließlich gängige FEM- und CAD-Programme sowie *Excel* und *PowerPoint* aus dem Microsoft Office Paket verwendet. Im Gegensatz zu statistischen Analyseverfahren sind damit keine speziellen Lizenzen oder Softwarekenntnisse erforderlich, um Wirkzusammenhänge quantitativ zu analysieren.

Die grafische Modellbildung mithilfe der *Einflusspfad-* und der *Cluster-Trend-Analyse* trug in den begleiteten Entwicklungsprojekten dazu bei,

- die mentalen Modellvorstellungen der beteiligten Konstrukteure zu strukturieren (eine Übersicht über die Problemstellung gewinnen, Systemverständnis ausbauen),
- die subjektiv wahrgenommene Komplexität der Gestaltungsprobleme zu reduzieren und
- die Funktionsanalyse gezielt auf einzelne Gestalt- und Prozessparameter zu fokussieren, für die ein besonderer Einfluss auf die Funktionserfüllung vermutet wurde.

Die Gegenüberstellung und der Vergleich der einzelnen Wirkzusammenhänge in einer *Einflussmatrix* ermöglichte nach Angaben der beteiligten Konstrukteure eine Ermittlung der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter durch einfaches Ablesen aus der Tabelle. Im Vergleich zu der bis dahin üblichen Vorgehensweise, Schlussfolgerungen aus einzelnen Diagrammen und Tabellen zu ziehen, war es mithilfe der Einflussmatrixanalyse leichter möglich, multivariate Wirkzusammenhänge zu bestimmen.

Neben den genannten Stärken konnten auch Schwächen bei der Erprobung in den Entwicklungsprojekten ermittelt werden. Kritisch wurde von einigen Konstrukteuren angemerkt, dass die vorgeschlagene Vorgehenssystematik einen besonders zeitintensiven Schwerpunkt auf die Problemeingrenzung⁷⁸³ legt (hier: die Ermittlung

⁷⁸⁰ vgl. Stürtzel 2012 S.93, Dammert 2013 S.56 (betreute Abschlussarbeiten), vgl. Kapitel 6.1.1

⁷⁸¹ vgl. Leiser 2011 S.35, Gaede 2013 S.61 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁸² vgl. Tian 2011 S.79, Stürtzel 2012 S.91, Kubel 2013 S.113 (betreute Abschlussarbeiten)

⁷⁸³ Die Problemeingrenzung wird der vorliegenden Arbeit als zentraler Bestandteil des SPALTEN-Problemlösungsprozesses (vgl. Albers 2005) besonders fokussiert.

von Wirkzusammenhängen und funktionsbestimmenden Konstruktionsparametern).⁷⁸⁴ Eine ähnliche Beobachtung beschreibt ALINK aus der Erprobung von Methoden der qualitativen Funktionsanalyse: Es „besteht die Gefahr, dass zu intensiv nach dem Problem gesucht wird, dass versucht wird, eine vollständige Erklärung für das Problem zu finden. [...] So wird das Aufzeigen möglicher Lösungen versäumt und ein Großteil der Zeit für die Analyse verwendet“.⁷⁸⁵

Während in den begleiteten Entwicklungsprojekten assoziative Gestaltungsideen bereits im Verlauf der Funktionsanalysen entstanden, war eine deduktive Entwicklung von Gestaltungsideen erst nach der Bestimmung der funktionsrelevanten Einflussgrößen (also zum Abschluss der in Kapitel 5.1 vorgeschlagenen Vorgehenssystematik) möglich. Der Aufwand zur Entwicklung von Gestaltungsideen wurde dadurch von den beteiligten Konstrukteuren als relativ hoch im Vergleich zu einer assoziativen Lösungsfindung eingeschätzt. Relativierend wurde jedoch angemerkt, dass die Funktionsanalyse bei assoziativ entwickelten Lösungen meist frühzeitig abgebrochen wird, sodass

- ein weniger stark ausgeprägtes Systemverständnis erarbeitet wird;
- nicht davon ausgegangen werden kann, dass es sich bei den entwickelten Gestaltungsideen um diejenigen mit der größten Wirkung auf die funktionalen Zielgrößen handelt;
- die Tendenz, etablierte durch neu entwickelte Lösungsprinzipien zu ersetzen (mit allen Vor- und Nachteilen),⁷⁸⁶ vergleichsweise hoch sei.

Eine weitere mögliche Relativierung des erhöhten Aufwands zur Problemeingrenzung sieht der Autor in der Wiederverwendung der geschaffenen Informationsbasis in nachfolgenden Produktgenerationsprojekten. Ebenso ist eine Effizienzsteigerung in der Validierung denkbar, die nach ALBERS besonders zeit- und kostenintensiv ist.⁷⁸⁷ Durch das vertiefte Systemverständnis könnte es leichter möglich sein, eine sachlogisch-begründete und damit effiziente Vorgehensweise zu wählen. Dies würde gegebenenfalls rechtfertigen, dass zunächst die Gestaltsynthese (zu der Konstrukteure sehr früh neigen)⁷⁸⁸ zugunsten einer ausführlichen Analyse zur Problemeingrenzung zurückgestellt wird. In nachfolgenden Forschungsarbeiten könnte dieser Aspekt näher beleuchtet werden.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die erforderliche Methodenkompetenz der Anwender. Zur Nutzung der vorgeschlagenen Methoden und Modellierungstechniken sei eine

⁷⁸⁴ vgl. Leiser 2011 S.43 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁸⁵ Alink 2010 S.101

⁷⁸⁶ diese Vor- und Nachteile betreffen z. B. die potenzielle Innovationshöhe, aber auch den erforderlichen Änderungsaufwand am Referenzprodukt und an assoziierten Produktionssystemen.

⁷⁸⁷ vgl. Albers 2011a, 2011b

⁷⁸⁸ vgl. Wiedner 2013 S.137ff.; siehe Kapitel 2.2.2

gewisse Einarbeitung notwendig, die als Mehraufwand wahrgenommen wird.⁷⁸⁹ Zur Förderung des Methodentransfers in die Praxis wurde ein Leitfaden zur Modellbildung vorgeschlagen, in dem für typische Anwendungsfälle erklärt wird, welche Methoden miteinander kombiniert werden können und wie die Funktionsweise eines Referenzprodukts bei der Modellbildung hinterfragt werden sollte. Die vorliegende Arbeit soll einen solchen Leitfaden für interessierte Entwicklungsingenieure bereitstellen. Als Vorbild dienen dazu die Heuristiken, die THAU für den Contact and Channel Approach (C&C²-A) formuliert hat.⁷⁹⁰

In einer Gesamtschau der Rückmeldungen, die der Autor von den begleiteten Entwicklungsingenieuren erhielt, wird ein ausgeprägtes Interesse festgestellt, die vorgeschlagene Systematik zur Weiterentwicklung der eigenen Denk- und Handlungsstrategien⁷⁹¹ aufzugreifen und nach individuellen Bedürfnissen zu adaptieren. Für den Autor der vorliegenden Arbeit erwächst daraus die Zuversicht, dass der vorgestellte Leitfaden dazu beiträgt, Systematik-orientierte Handlungsmuster bei Entwicklungsingenieuren zu vertiefen bzw. für jene leichter zugänglich zu machen, die bisher stärker einem umsetzungs-orientierten Handlungsmuster zugeneigt sind.⁷⁹²

6.1.3 Zweck und Anwendungsgrenzen der Modellbildung

In den begleiteten Entwicklungsprojekten wurden die vorgeschlagenen Modellierungstechniken vorwiegend in solchen Fällen als Unterstützung wahrgenommen, in denen eine große, im Nachhinein subjektiv beurteilte Komplexität

- eines Entwicklungsproblems im Allgemeinen und
- der funktionsrelevanten Wirkzusammenhänge im Speziellen

vorlag, die mithilfe von mentalen Modellen und opportunistischen Handlungsstrategien nur unzureichend beherrscht worden wäre.⁷⁹³ In Kapitel 4 und 5 wurde gezeigt, dass bereits die Wirkzusammenhänge einer rückensteifen Schubkette oder einer Blechbohrschraube im Detail eine hohe Komplexität aufweisen kann, die allein mit mentalen Modellen nur schwer zu handhaben wäre.⁷⁹⁴ Damit bleibt die Herausforderung bestehen, dass die Komplexität eines Gestaltungsproblems a priori nur schwer richtig eingeschätzt werden kann – hier besteht nach Ansicht des Autors weiterhin Forschungsbedarf, insbesondere mit Bezug auf die Produktgenerationsentwicklung.

⁷⁸⁹ vgl. Leiser 2011 S.51 (betreute Abschlussarbeit)

⁷⁹⁰ vgl. Thau 2013 S.71ff. und S.103ff.

⁷⁹¹ siehe Kapitel 2.2.2

⁷⁹² vgl. Wiedner 2013 S.135ff.

⁷⁹³ siehe Kapitel 4.2: Methodische Barrieren der Funktionsanalyse

⁷⁹⁴ siehe Kapitel 4.2.3 „Induktionsbarriere“

Aus Sicht der beteiligten Entwicklungsingenieure bestand der Zweck der Modellbildung vorwiegend in der Entwicklung einer Übersicht über den Zusammenhang von Funktion und Gestalt der Referenzprodukte. Die Modellbildung wurde zu diesem Zweck begleitend zu empirischen Recherchen, Versuchen und Simulationsexperimenten durchgeführt, um Beobachtungen bzw. Prognosen miteinander zu verknüpfen (induktive Modellbildung) und ein besseres Verständnis für die komplexen Wirkzusammenhänge aufzubauen. Durch Auswertung der Modelle konnten nicht nur Hypothesen über funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter gebildet, sondern – mit zunehmendem Systemverständnis – auch Vorschläge zur Gestaltung dieser Parameter entwickelt werden (deduktive Synthese). Eine anschließende Verifizierung und Validierung der (Zwischen-)Ergebnisse erweiterte wiederum die Wissensbasis, sodass die gebildeten Hypothesen korrigiert und die Gestaltungsideen präzisiert werden konnten.

In Abbildung 6.4 ist diese iterative Abfolge der empirischen Informationsakquise und der theoretischen Modellbildung exemplarisch dargestellt. Die vorliegende Forschungsarbeit ist in diesem Kontext auf Methoden und Modellierungstechniken fokussiert, die eine induktive Modellbildung und eine deduktive Synthese unterstützen.

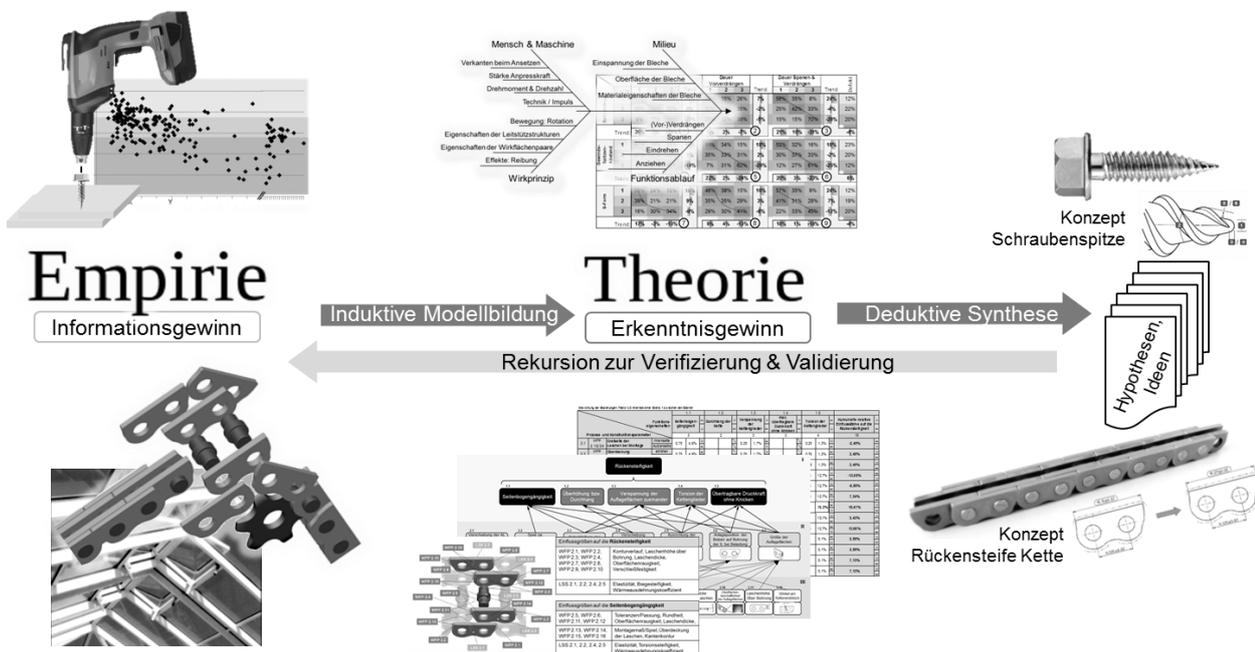


Abbildung 6.4: Zusammenhang von empirischer Informationsakquise und theoretischer Modellbildung am Beispiel der Fallstudien III (oben) und I (unten)

Eine notwendige Voraussetzung für die induktive Modellbildung ist das Vorhandensein eines Referenzprodukts. Die Anwendungsfälle, die durch die vorgestellten Modellierungstechniken adressiert werden, beziehen sich dementsprechend

vorwiegend auf die Gestaltvariation im Kontext der Produktgenerationsentwicklung. Sie sind dadurch charakterisiert, dass etablierte Wirkprinzipien übernommen und durch inkrementelle Änderungen an den Eigenschaften der Produktgestalt weiterentwickelt werden, um ausgewählte Funktionen oder Funktionseigenschaften des Referenzprodukts zu verbessern.⁷⁹⁵

Eine Einschätzung zur Eignung der empfohlenen Modellierungstechniken für Konstruktionsprobleme, deren Komplexität im Vergleich zu den begleiteten Fallstudien deutlich höher eingestuft werden muss (z. B. Schaltcharakteristika bei der Getriebeentwicklung), kann nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Nach Ansicht des Autors muss in diesem Fall z. B. die X-in-the-Loop Methodik angewendet werden, um die komplexen Wirkzusammenhänge, die sich vielfach erst im Gesamtsystem-Kontext ergeben, ausreichend berücksichtigen zu können.

6.2 Reflexion der Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext

Ausgehend von den Erkenntnissen aus der Erprobung der vorgeschlagenen Modellierungstechniken werden nachfolgend die Zielerreichung und die Forschungsfragen dieser Arbeit reflektiert und im Kontext des Stands der Forschung bewertet.

Das erste Ziel dieser Arbeit⁷⁹⁶ besteht in der Entwicklung von Empfehlungen zur qualitativen und quantitativen Modellierung multivariater Wirkzusammenhänge, mit denen funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter ermittelt werden können. Mit dieser Zielstellung korrelieren die Forschungsfragen 1 und 2, die nachfolgend beantwortet werden sollen.

Die **Forschungsfrage 1** dieser Arbeit befasst sich mit der Untersuchung, welche konstruktionswissenschaftlichen Ansätze für eine qualitative und quantitative Funktionsanalyse geeignet sind. Sie wird durch das Portfolio der in Kapitel 5.2 und 5.3 vorgestellten Modellierungstechniken beantwortet. Die positive Beurteilung durch die an den Fallstudien beteiligten Entwicklungsingenieure⁷⁹⁷ und die Ergebnisse der entsprechenden Entwicklungsprojekte⁷⁹⁸ bestätigen ebenfalls ihre Eignung für die Gestaltvariation im Kontext der Produktgenerationsentwicklung.⁷⁹⁹

⁷⁹⁵ vgl. Albers 2015a

⁷⁹⁶ siehe Kapitel 3.1

⁷⁹⁷ siehe Kapitel 6.1.2

⁷⁹⁸ Die Ergebnisse der Entwicklungsprojekte wurden exemplarisch in Kapitel 5.4 vorgestellt.

⁷⁹⁹ siehe Kapitel 6.1.3

Die vorgeschlagenen Methoden und Modellierungstechniken wurden in den Fallstudien erfolgreich eingesetzt, um

- Informationen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt aus empirischen Erhebungen (Recherche, Versuche, Simulationsexperimente) miteinander zu verknüpfen und grafisch bzw. tabellarisch aufzubereiten;
- Hypothesen über Wirkzusammenhänge zu bilden und qualitativ und quantitativ zu beschreiben;
- funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter zu ermitteln, die als Stellgrößen zur Verbesserung von Funktionen und Funktionseigenschaften genutzt werden können. Die Forschungshypothese 2 dieser Arbeit wird damit als bestätigt angesehen.

Die methodische Grundlage der vorliegenden Forschungsarbeit wird aus verschiedenen konstruktionswissenschaftlichen Ansätze gebildet, die sich mit der Bedeutung von Funktionen, Eigenschaften und der Gestalt beim Konstruieren befassen.⁸⁰⁰ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die unterschiedlichen Ansätze und Perspektiven miteinander verknüpft, um

- sowohl die Funktionen und die Wirk-Struktur (entsprechend dem *Contact and Channel Approach (C&C²-A)* nach ALBERS und MATTHIESEN)⁸⁰¹
- als auch die Funktionseigenschaften und die Eigenschaften der Produktgestalt (angelehnt an die Arbeiten von HUBKA, ROOZENBURG, BIRKHOFFER, EHRENSPIEL, ANDREASEN und WEBER)⁸⁰²

in den Fokus einer Funktionsanalyse zu stellen. Erst die Verknüpfung dieser unterschiedlichen Perspektiven ermöglicht eine durchgängige Erklärung der Wirkzusammenhänge zwischen Funktionen bzw. Funktionseigenschaften und den funktionsbestimmenden Gestalt- bzw. Prozessparametern technischer Systeme, die als Stellgrößen beim Konstruieren verändert werden können. In Abbildung 6.5 ist die Herleitung dieser Wirkzusammenhänge durch induktive Modellbildung exemplarisch anhand einer rückensteifen Antriebskette aus Fallstudie I dargestellt.⁸⁰³

⁸⁰⁰ siehe Kapitel 2.3 und 2.4

⁸⁰¹ vgl. Albers 2002, Matthiesen 2002, Albers 2014a

⁸⁰² vgl. siehe Kapitel 2.4.1

⁸⁰³ vgl. Tian 2011 (betreute Abschlussarbeit); die einzelnen Modelle werden in Kapitel 5 erläutert.

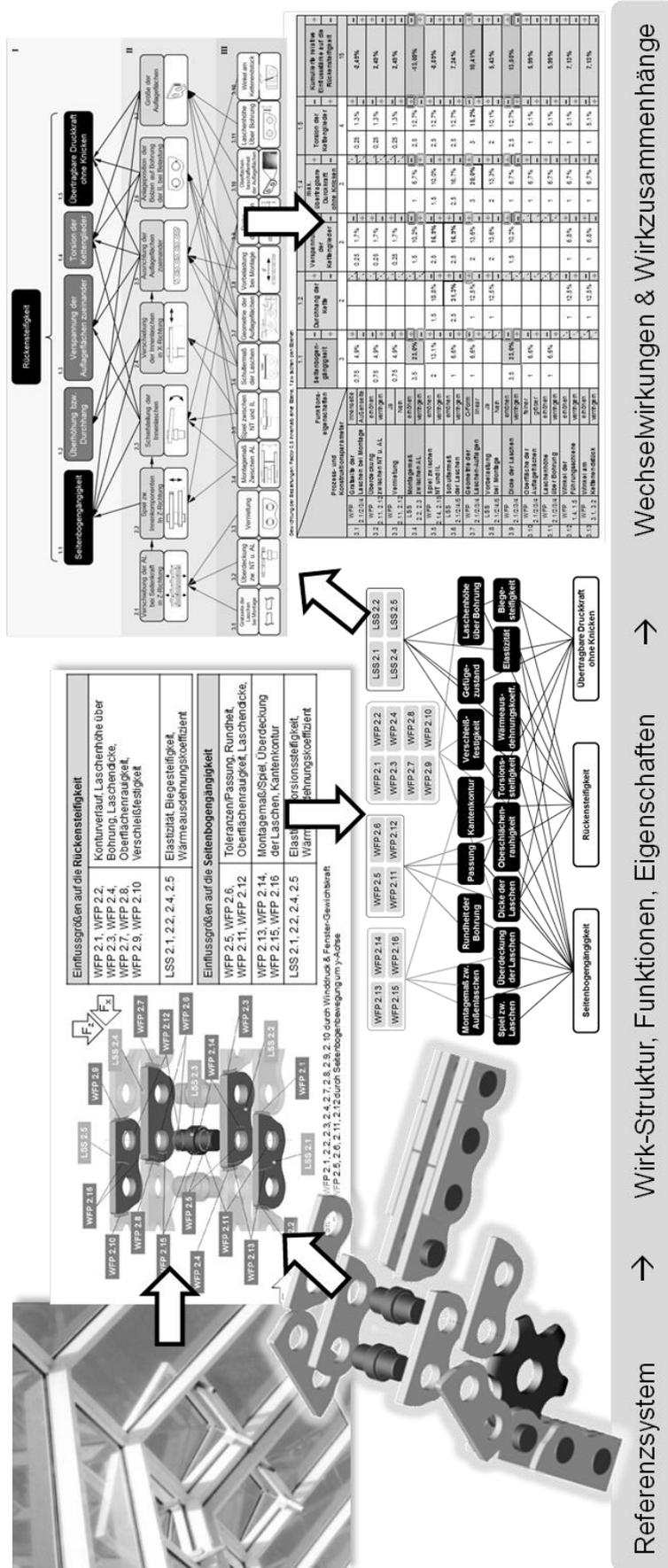


Abbildung 6.5: Qualitative und quantifizierte Modellierung der Zusammenhänge von Funktion und Gestalt am Beispiel einer rückensteifen Antriebskette aus Fallstudie I

Die **Forschungsfrage 2** dieser Arbeit befasst sich mit der Untersuchung, welche Modellierungstechniken für eine quantitative Analyse von Wirkzusammenhängen geeignet sind. In den empirischen Fallstudien dieser Arbeit wurden die qualitativ modellierten Wirkzusammenhänge⁸⁰⁴ jeweils mithilfe von Einflusspfad-, Cluster-Trend- und Einflussmatrixmodellen quantifiziert. Je nach Datengrundlage konnte damit die relative Einflussstärke (bei einer Einflusspfadanalyse) oder die Häufigkeit der beobachteten Korrelationen zwischen Einfluss- und Zielgrößen (bei einer Cluster-Trend-Analyse) bestimmt werden.

Bei einer Beurteilung dieser drei Modellierungstechniken muss berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um vergleichsweise pragmatische Quantifizierungs- und Bewertungsverfahren handelt. Ihr Zweck besteht in der methodischen Unterstützung einer lösungsorientierten Funktionsanalyse. In diesem Sinne wird für die vorgestellte Systematik auch keine Beweisführung hinsichtlich eines formal-logischen Aufbaus angestrebt. Vielmehr wird die Nützlichkeit beim Konstruieren als Bewertungsmaßstab verwendet. In den begleiteten Entwicklungsprojekten zeigte sie sich einerseits in Gestaltungsideen zur Entwicklung neuer Produktgenerationen⁸⁰⁵ und andererseits in der positiven Beurteilung der an den Fallstudien beteiligten Entwicklungsingenieure.⁸⁰⁶

Im Vergleich muss jedoch festgehalten werden, dass die Ergebnisse, die mit den in Kapitel 5.3 vorgeschlagenen Modellierungstechniken erreicht werden können, nicht an die numerische Präzision statistischer Verfahren heranreichen. Die Modellierungstechniken orientieren sich dafür jedoch

- an der für die Entwurfsphase der Konstruktion geltende Maxime, besser *„zufrieden stellende Lösungen unter akzeptablem Aufwand zu entwickeln als ideale Lösungen“*⁸⁰⁷ unter hohem Aufwand zu suchen, sowie
- an den individuellen Möglichkeiten zur Datenerhebung⁸⁰⁸ und den verfügbaren Methodenkompetenzen der beteiligten Systemkonstrukteure.⁸⁰⁹

Im Vergleich zu statistischen und numerischen Analyseverfahren stellen die vorgeschlagenen Modellierungstechniken einen geringeren Anspruch sowohl an die Methodenkompetenz ihrer Anwender als auch an die Qualität der Daten aus empirischen Recherchen, Versuchen und Simulationsexperimenten. Eine weitere Stärke besteht in der universellen Anwendbarkeit, da z. B. die Cluster-Matrix-Analyse

⁸⁰⁴ hierzu wurde z. B. der Contact and Channel Approach verwendet, siehe Kapitel 5.2

⁸⁰⁵ siehe Kapitel 5.4

⁸⁰⁶ siehe Kapitel 6.1.2

⁸⁰⁷ Bender 2004 S.233

⁸⁰⁸ siehe Abbildung 6.3

⁸⁰⁹ siehe Kapitel 2.5.5

sowohl für explorative (strukturentdeckende) als auch für konfirmatorische (strukturprüfende) Zwecke eingesetzt werden kann.

Als Fazit wird damit festgehalten, dass es im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit gelungen ist, das bestehende Portfolio konstruktionsmethodischer Ansätze zur *qualitativen* Funktionsanalyse um neu entwickelte Modellierungstechniken zur *quantitativen* Funktionsanalyse zu ergänzen. In Abbildung 6.6 sind die untersuchten qualitativen und quantitativen Verfahren vergleichend zueinander dargestellt. Darin wird deutlich, dass der Anwendungsbereich konstruktionswissenschaftlicher Methoden und Modellierungstechniken⁸¹⁰ auch auf solche Problemstellungen erweitert wurde, die bislang nur statistischen Analyseverfahren oder Simulations- und Parameteroptimierungsverfahren vorbehalten waren.⁸¹¹

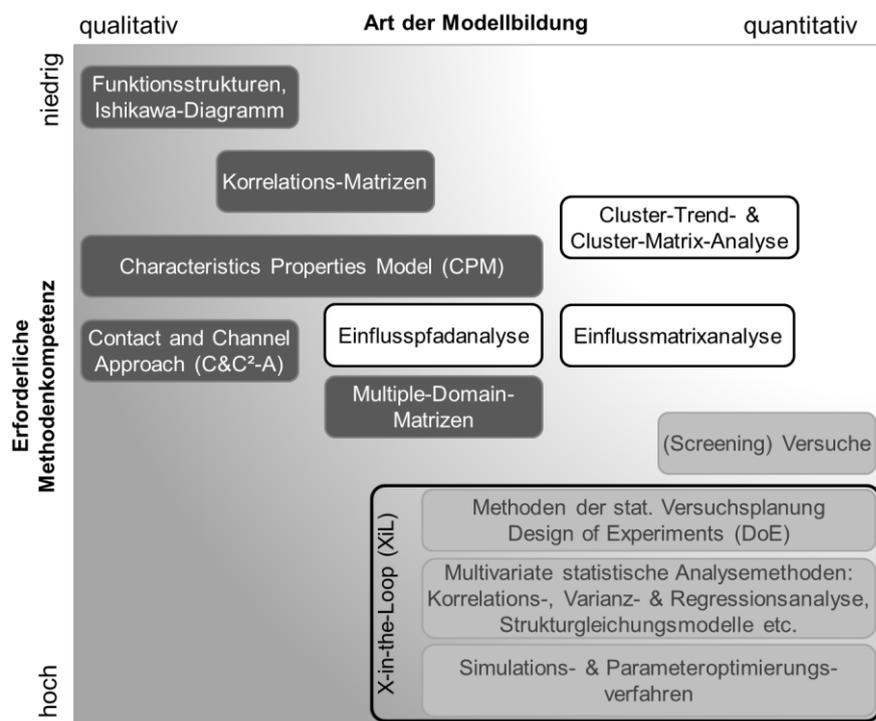


Abbildung 6.6: Erweiterung des bestehenden konstruktionsmethodischen Portfolios (schwarz) um Modellierungstechniken zur quantifizierten Funktionsanalyse (weiß)

Die **Forschungsfragen 3** und **4** dieser Arbeit befassen sich mit der Untersuchung, wie die vorgenannten Methoden und Modellierungstechniken zu einer deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen und einer Tragweitenanalyse beitragen können.

⁸¹⁰ siehe Kapitel 4.3.2. Im Kontext dieser Arbeit werden lediglich solche Methoden betrachtet, die zur Unterstützung menschlicher Denk und Handlungsstrategien dienen. (Teil-)Automatisierte Konstruktionsansätze werden bewusst nicht berücksichtigt.

⁸¹¹ siehe Kapitel 4.3.2 und 6.1.1

Sie werden durch das in Kapitel 5.4 exemplarisch beschriebene Vorgehen in den Fallstudien I, III und VI beantwortet. Die Forschungshypothese 3 dieser Arbeit wird damit als bestätigt angesehen.

Die Forschungsfragen 3 und 4 adressieren auch das zweite Ziel dieser Arbeit:⁸¹² Die Entwicklung einer Vorgehenssystematik, die als Leitfaden zur Funktionsanalyse und zur deduktiven Synthese von Gestaltungsideen genutzt werden kann.

In Kapitel 5.1 wurde eine solche Vorgehenssystematik entwickelt. Sie ergänzt das konstruktionsmethodische Portfolio zur *assoziativen* Entwicklung von Gestaltungsideen⁸¹³ um einen Leitfaden und korrespondierende Modellierungstechniken für eine *deduktive* Gestaltsynthese. Der Verb „ergänzen“ wird an dieser Stelle bewusst verwendet, denn im Verlauf der begleiteten Entwicklungsprojekte entstanden auch interessante assoziative Gestaltungsideen. Sie wurden durch eine ausführliche Funktionsanalyse und ein damit einhergehendes, vertieftes Systemverständnis angeregt.⁸¹⁴ Das deduktive Vorgehen war zwar nach Ansicht der beteiligten Konstrukteure mit einem höheren Aufwand zur Ideengenerierung verbunden, da sie erst zum Abschluss der quantitativen Funktionsanalyse abgeleitet werden konnten.⁸¹⁵ Durch ihre sachlogische Herleitung war es jedoch möglich, auch unerwünschte Wirkungen auf sekundäre Funktionen und Funktionseigenschaften abzuschätzen und so zu einer nachvollziehbar begründeten (und transparent dokumentierten) Entscheidungsfindung beizutragen. Exemplarisch wurde dies in Kapitel 5.4.1 gezeigt.

Als Fazit wird damit festgehalten, dass die kausalen Zusammenhänge von Funktion und Gestalt ein durchgehend induktiv-deduktives Vorgehen (von der Funktionsanalyse bis zur Synthese von Gestaltungsideen) ermöglichen. Die Forschungshypothese 1 dieser Arbeit wird damit als bestätigt angesehen.

6.3 Nutzen der Arbeit für die Forschung und Entwicklungspraxis

Die Konstruktionswissenschaft befasst sich mit der Untersuchung und Entwicklung von Vorgehensstrategien, die das Problemlösen beim Konstruieren unterstützen.⁸¹⁶ Anders als in naturwissenschaftlichen Disziplinen ist hierbei eine Trennung von Forschung und Praxis⁸¹⁷ kaum möglich. Vielmehr liegt bereits durch den Gegenstand

⁸¹² siehe Kapitel 3.1

⁸¹³ Kreativitätstechniken, Konstruktionskataloge, „Variation der Gestalt“ etc; vgl. Ehrlenspiel 2009 S.409ff.

⁸¹⁴ siehe Kapitel 5.1.5

⁸¹⁵ siehe Kapitel 6.1.2

⁸¹⁶ siehe Kapitel 2.1.3

⁸¹⁷ Der Begriff „Praxis“ bezeichnet hier die wirtschaftliche Verwertung von Forschungsergebnissen in der Industrie.

der Forschung eine Ausrichtung der Untersuchungen an den expliziten und impliziten Bedarfssituationen von Konstrukteuren in der Entwicklungspraxis nahe.

Trotz dieses allgemein akzeptierten Selbstverständnisses scheinen jedoch die meisten konstruktionsmethodischen Forschungsarbeiten weniger auf problemspezifische Handlungsstrategien und Modellierungstechniken, sondern auf allgemeine Theorien⁸¹⁸ und prozedurale Vorgehensmodelle (vor allem für Neukonstruktionen)⁸¹⁹ ausgerichtet zu sein. Als Resultat diagnostizieren BIRKHOFER und JÄNSCH die in Kapitel 2.1.3 erläuterten Anwendungsbarrieren von Konstruktionsmethoden in der Entwicklungspraxis.⁸²⁰

Für das Thema und den Kontext der vorliegenden Forschungsarbeit zeigt sich dieses Phänomen exemplarisch an dem in Kapitel 2.3 und 2.4 erläuterten Stand der Forschung: Vielfach steht eine kontroverse Diskussion um die Frage nach der Bedeutung und den Relationen der Begriffe „Funktion“, „Eigenschaft“, „Gestalt“ etc. stärker im Vordergrund, als die Erforschung von operativ nutzenstiftenden Methoden zur Funktionsanalyse und Gestaltsynthese in der Produktgenerationsentwicklung.

Aus wissenschaftlicher Sicht kann diese Schwerpunktsetzung mit der Bedeutung einer ausführlichen Situations- und Problemanalyse gerechtfertigt werden,⁸²¹ bei der zunächst der Erkenntnis- und Wissenserwerb sowie die Modellbildung im Vordergrund stehen sollten. Durch die Einbindung der vorliegenden Forschungsarbeit in die Konstruktionspraxis – und der damit einhergehenden Konfrontation des Autors mit konkreten Problem- und Bedarfssituationen sowie Erwartungen der beteiligten Konstrukteure gegenüber der Forschung – wurde jedoch auch deutlich, dass der einleitend genannte Zweck der Konstruktionswissenschaft nur mit analytisch geprägten Untersuchungen (und theoretischen Diskussionen zur fachlichen Nomenklatur) nicht erreicht werden kann.

Nach Ansicht des Autors bedarf es daher für eine konstruktionswissenschaftliche Arbeit zweierlei Schwerpunkte – den Erkenntnisgewinn *und* die Erkenntnisumsetzung in nutzenstiftende Hilfsmittel – um einen wissenschaftlichen Fortschritt beanspruchen und vertreten zu können. Mit diesem Anspruch der Konstruktionswissenschaft kann eine fruchtbare Beziehung zwischen Forschung und Praxis entstehen, die nicht nur neues Wissen schafft, sondern auch dazu beiträgt, die technologische und die methodische Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Maschinenbaus zu fördern.

⁸¹⁸ vgl. Hubka 1984, Umeda 1990, Suh 1990 & 1998, Weber 2000 & 2014, Albers 2011b, Eckert 2013

⁸¹⁹ vgl. Rodenacker 1991, Roth 1992, Koller 1994, Pahl & Beitz 2005

⁸²⁰ vgl. Birkhofer 1991, Jänsch 2007

⁸²¹ siehe Kapitel 2.2.2

Der Erkenntnisgewinn der vorliegenden Forschungsarbeit besteht in der Erklärung, wie aus Sicht der Konstruktion die Qualität der Funktionserfüllung mit der Ausprägung der Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften eines technischen Systems in Zusammenhang steht. Diese Erklärung erfolgt durch Verknüpfung der in Kapitel 2.3 und 2.4 vorgestellten Forschungsarbeiten zu Funktionen und zu Eigenschaften technischer Systeme. Sie basiert maßgeblich auf der Modellvorstellung des *Contact and Channel Approach*,⁸²² dass Funktionen über die Wirk-Struktur eines technischen Systems realisiert werden:

Die Qualität der Funktionserfüllung ist demnach von der Beschaffenheit der Produktgestalt abhängig. Als Wirkzusammenhang wird die kausale Beziehung zwischen Prozess- bzw. Konstruktionsparametern und Funktionen bzw. Funktionseigenschaften eines technischen Systems bezeichnet.⁸²³ Beim Konstruieren können (nach Festlegung der Wirkprinzipien) lediglich diese Gestalt- und Prozessparameter, d. h.

- die Prozessparameter der Fertigung und Montage
- sowie die geometrischen und stofflichen Eigenschaften der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen

unmittelbar beeinflusst werden.⁸²⁴ Sie haben im Betrieb einen wesentlichen Einfluss auf die Wirkungs- und Zustandseigenschaften der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen und dadurch auf die Funktionen und Funktionseigenschaften eines technischen Produkts.⁸²⁵ In der vorliegenden Arbeit wird damit erklärt, wie sich die Qualität der Funktionserfüllung technischer Produkte auf einzelne funktionsrelevante Gestalt- und Prozessparameter zurückführen lassen.

Die **Umsetzung dieser Erkenntnisse in operativ nutzenstiftende Hilfsmittel** erfolgt in Form von Empfehlungen zur qualitativen und quantitativen Modellierung technischer Wirkzusammenhänge.⁸²⁶ Die drei neu entwickelten, quantitativen Modellierungstechniken⁸²⁷ greifen die bestehenden Methoden zur qualitativen Funktionsanalyse⁸²⁸ auf und erweitern ihren Anwendungsbereich auf solche Anwendungsfälle, in denen eine quantitative Funktionsanalyse und eine deduktive Gestaltsynthese gefordert werden.⁸²⁹ In den begleiteten Entwicklungsprojekten

⁸²² siehe Kapitel 2.3.3

⁸²³ siehe Kapitel 2.4.1

⁸²⁴ vgl. Andreasen 1980, Weber 2012

⁸²⁵ Die Eigenschaften und Einflüsse der Systemumgebung haben einen weiteren wesentlichen Einfluss auf die Funktionserfüllung.

⁸²⁶ siehe Kapitel 5

⁸²⁷ siehe Kapitel 5.3

⁸²⁸ siehe Kapitel 5.2

⁸²⁹ siehe Abbildung 6.6

wurde mit diesen Modellierungstechniken nicht nur ein umfassendes Systemverständnis zu den funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparametern aufgebaut. Davon ausgehend wurden auch neue Gestaltungsideen entwickelt, durch die die gewünschten Funktionen und Funktionseigenschaften in der geforderten Ausprägung bzw. Qualität erfüllt werden.

Zur Förderung des Methodentransfers in die Praxis beruhen die vorgeschlagenen Modellierungstechniken auf gängigen Werkzeugen der Konstruktionspraxis.⁸³⁰ Durch die Einbindung in eine Vorgehenssystematik (→ Kapitel 5.1) sind sie nicht isoliert, sondern in Verknüpfung zueinander und im Kontext möglicher Anwendungsfälle beschrieben. Es werden Kombinationsmöglichkeiten aufgezeigt und Anwendungsbeispiele dafür gegeben, wie die vorgeschlagenen Methoden und Modellierungstechniken die Denk- und Handlungsstrategien von Konstrukteuren unterstützen können. Hierdurch sollen Brüche in der Methodenanwendung vermieden werden.⁸³¹

⁸³⁰ In den Fallstudien wurden ausschließlich gängige FEM- und CAD-Programme sowie Excel und PowerPoint aus dem Microsoft Office Paket verwendet. Hierbei wurden lediglich die Grundfunktionen der jeweiligen Programme verwendet – es wurde keine Erweiterung durch Programmierung vorgenommen.

⁸³¹ vgl. Alink 2010 S.33 und Kapitel 4.3.1

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird eine Vorgehenssystematik zur qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse entwickelt,⁸³² die Systemkonstruktoren als ein Leitfaden zur deduktiven Entwicklung von Gestaltungsideen dienen soll. Dieser Leitfaden basiert auf einem Erklärungsmodell für den kausalen Zusammenhang zwischen den Funktionen bzw. Funktionseigenschaften eines technischen Systems und den Gestalt-, Wirkungs- und Zustandseigenschaften der korrespondierenden Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen.⁸³³

Die Anwendungsfälle, die durch den Leitfaden adressiert werden, beziehen sich vorwiegend auf Problemstellungen, die durch eine *Gestaltvariation* im Kontext der Produktgenerationsentwicklung gelöst werden können. Sie sind dadurch charakterisiert, dass bestehende Lösungsprinzipien einer Vorgänger-Produktgeneration durch Variation der funktionsbestimmenden Gestalt- und Prozessparameter weiterentwickelt werden, um ausgewählte Funktionen oder Funktionseigenschaften zu verbessern.

Für diese Anwendungsfälle werden einerseits etablierte entwicklungsmethodische Ansätze zur *qualitativen Funktionsanalyse* empfohlen und deren Anwendung beschrieben.⁸³⁴ Andererseits werden mit der *Einflusspfadanalyse* und der *Einflussmatrixanalyse*, sowie der *Cluster-Trend-Analyse* und der *Cluster-Matrix-Analyse* jeweils zwei aufeinander aufbauende Modellierungstechniken vorgestellt, die den Anwendungsbereich konstruktionsmethodischer Ansätze erweitern auf Fragestellungen der quantitativen Funktionsanalyse und der quantitativen Modellierung multivariater Wirkzusammenhänge.⁸³⁵ Die Anwendungsfelder dieser Modellierungstechniken unterscheiden sich dadurch, dass für die beiden zuletzt genannten Verfahren numerische Messdaten aus Versuchen oder Simulationsexperimenten verfügbar sein müssen, wohingegen die beiden erstgenannten Verfahren in den begleiteten Fallstudien immer dann angewendet wurden, wenn lediglich nominal- und ordinalskalierte Daten⁸³⁶ aus Recherchen und Experteneinschätzungen vorlagen.⁸³⁷

⁸³² siehe Kapitel 5.1

⁸³³ siehe Kapitel 2.3.1 und 2.4.1

⁸³⁴ siehe Kapitel 5.2

⁸³⁵ siehe Kapitel 5.3

⁸³⁶ siehe Tabelle 2-3 in Kapitel 2.4.2

⁸³⁷ siehe Abbildung 6.3 in Kapitel 6.1.1

Die vorgeschlagenen Modellierungstechniken und die Vorgehenssystematik wurden in acht empirischen Fallstudien in der Konstruktionspraxis erprobt und weiterentwickelt. Dabei wurden unterschiedliche Problemsituationen berücksichtigt, in denen Informationen zur Funktionsweise der Referenzprodukte

- vorwiegend *qualitativ* durch Dokumenten-Recherchen und Expertengespräche
- oder auch *quantitativ* durch Versuche und Simulationsexperimente

zugänglich sind. Je nach Datengrundlage wurde die relative Einflussstärke (mit einer Einflusspfadanalyse) oder die Häufigkeit der beobachteten Korrelationen (mit einer Cluster-Trend-Analyse) zwischen Einfluss- und Zielgrößen bestimmt. Durch Zusammenführung der Erkenntnisse in Matrizen wurden funktionsbestimmende Gestalt- und Prozessparameter ermittelt und Gestaltungsideen zur Verbesserung der Referenzprodukte deduktiv abgeleitet.

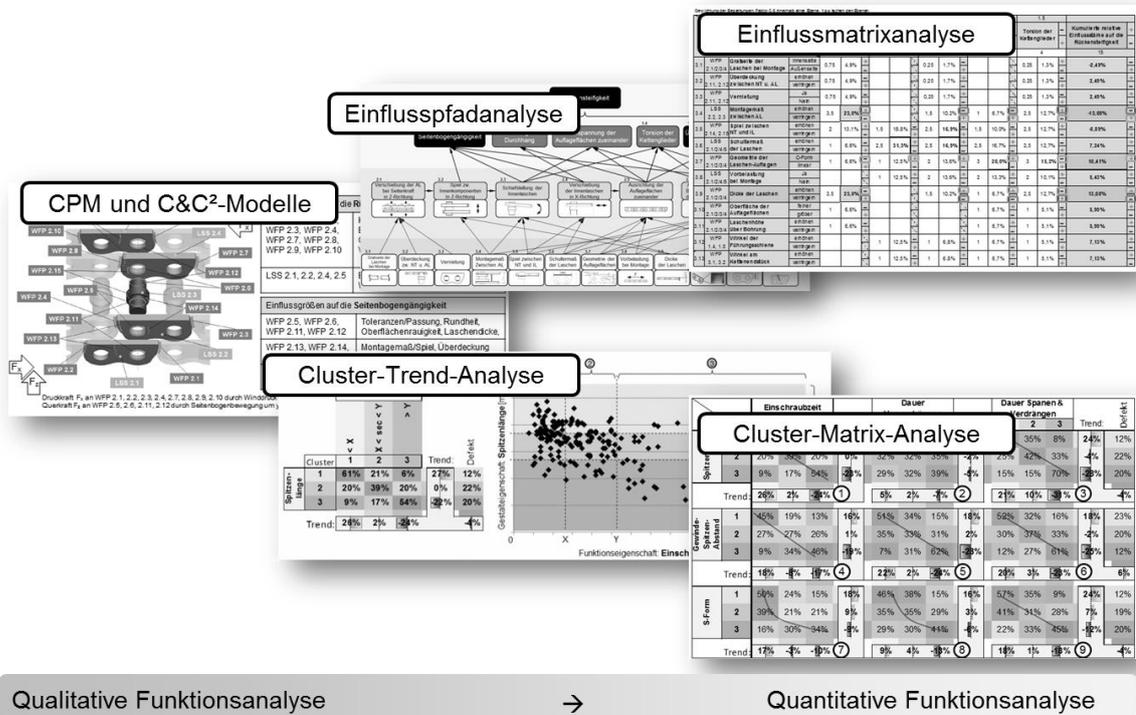


Abbildung 7.1: Modellierungstechniken zur qualitativen und quantitativen Analyse multivariater Wirkzusammenhänge beim Konstruieren

Durch die empirischen Fallstudien wurde gezeigt, dass die kausalen Zusammenhänge von Funktion und Gestalt ein durchgehend induktiv-deduktives Vorgehen von der Funktionsanalyse bis zur Synthese von Gestaltungsideen ermöglichen. Als Schlüssel für dieses induktiv-deduktive Vorgehen wird eine durchgehende Methodenunterstützung bei der qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse angesehen. Sie unterstützt die individuellen Denk- und Handlungsstrategien von Systemkonstruktoren bei der Bildung von Hypothesen

über Wirkzusammenhängen und der Ermittlung der Gestalt- und Prozessparameter, die einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung haben. Durch Variation dieser funktionsbestimmenden Einflussgrößen können Gestaltungsideen zur Verbesserung von Funktionen und Funktionseigenschaften eines Referenzprodukts deduktiv abgeleitet werden.

7.2 Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bilden eine Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten, zu denen nachfolgend einige Anregungen gegeben werden soll:

Untersuchungen zur Methodenergonomie und zur Methodenakzeptanz

Zunächst wäre eine *fortgesetzte Validierung* der vorgeschlagenen Vorgehenssystematik und Modellierungstechniken wünschenswert. In der vorliegenden Arbeit wurde eine erste Erprobung in der Entwicklungspraxis durchgeführt, um die prinzipielle Wirksamkeit für unterschiedliche Problemsituationen zu überprüfen. Weiterführende Arbeiten könnten sich damit befassen, die Anwendung der vorgeschlagenen Methoden und Modellierungstechniken ohne Anleitung durch einen externen Methodenexperten zu untersuchen. Daraus könnten Rückschlüsse auf die *Methodenergonomie* und die *Methodenakzeptanz* gezogen werden, die in der vorliegenden Arbeit durch die Methodencoaching-Funktion des Autors nicht objektiv möglich waren. Hierzu wären rein beobachtende Fallstudien in unterschiedlichen Branchen des Maschinenbaus sinnvoll.

Weitere Forschungsarbeiten sind zur *Werkzeugunterstützung* bei der Modellbildung denkbar. In Laborstudien oder begleiteten Entwicklungsprojekten sollte untersucht werden, inwiefern ein Einfluss der Werkzeugnutzung (Stift und Papier, Whiteboards, Softwaretools etc.) auf die Kommunikationsprozesse und die subjektiv wahrgenommene Ergonomie der Methodenanwendung besteht. Hieraus können Empfehlungen zur Entwicklung von Konstruktionsmethoden erarbeitet werden.

Modellierung von Wirkzusammenhängen als Beitrag zur Risikoanalyse

Ebenso interessant erscheint eine Übertragung der Ergebnisse einer Einflusspfad-, Cluster-Trend- oder Einflussmatrixanalyse auf Aktivitäten, die mit einer *Risikoanalyse* beim Konstruieren befasst sind. Sie könnten als Ausgangsbasis für eine System-FMEA dienen, um abzuschätzen,

- welche Einflussgrößen (äußere Einflüsse sowie Gestalt- und Prozessparameter) störanfällig bzw. fehlerauslösend sein könnten und

- wie sich veränderte Einflussgrößen auf die Funktionen und Funktionseigenschaften des betrachteten Referenzprodukts auswirken.

Exemplarisch besteht bei der Bildung von Risiko-Kennzahlen die Möglichkeit, die Bedeutung (B) und die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) einer Störung bzw. eines Fehlverhaltens mithilfe der Ergebnisse einer Einflusspfadanalyse bzw. einer Cluster-Trend-Analyse kausal begründet abzuschätzen. Diese zwei Beispiele zeigen exemplarisch die Potenziale einer Funktionsanalyse zum Zweck der Tragweiten- und Risikoanalyse auf.

Funktionsanalyse als Beitrag zur Beurteilung von Produktänderungen

In der Literatur sind verschiedene Arbeiten zur Beurteilung von technischen Produktänderungen verfügbar, um für Lösungsvorschläge z. B. den Änderungsaufwand und die Verhaltensreaktion eines Referenzprodukts abschätzen. Exemplarisch wurden dazu in Kapitel 2.5.4 die Arbeiten von KÖHLER und WEBER genannt.⁸³⁸ Die Möglichkeiten einer Kombination dieser Tragweitenanalyse mit einer qualitativen und quantitativen Funktionsanalyse sind bislang noch nicht untersucht.

Bisherige Arbeiten basieren auf einer erfahrungsbasierten Kennzahlenbildung, bei der anhand von allgemeinen (d. h. nicht anwendungsfallspezifischen) Kriterienkatalogen Kennzahlen abgeschätzt oder aus Skalen abgeleitet werden.⁸³⁹ Erkenntnisse aus einer Untersuchung der Wirk-Struktur (Funktionsanalyse) werden nicht explizit berücksichtigt. Der Autor geht davon aus, dass die bisherigen Beurteilungsverfahren durch eine derartige Kopplung von Funktions- und Tragweitenanalyse präzisiert werden können.

Modellierung von Anwendungsfällen, Testfällen und Entwicklungsszenarien

Im Hinblick auf die vorgestellten Modellierungstechniken wären ergänzende Untersuchungen darüber sinnvoll, wie die funktionsbestimmenden Eigenschaften und Einflussgrößen der Umgebungssysteme für unterschiedliche *Anwendungsfälle* (use-cases) systematisch bestimmt werden können, sodass repräsentative *Entwicklungsszenarien* (design-cases) und *Testfälle* (test-cases) für das Zielsystem eines Projekts abgeleitet werden können.⁸⁴⁰ In den begleiteten Entwicklungsprojekten fiel es oft schwer, aus einer Vielzahl von bekannten und vermuteten Anwendungsfällen der Referenzprodukte nicht nur Extremsituationen, sondern ein repräsentatives Kollektiv der Betriebsbedingungen abzuschätzen.

⁸³⁸ vgl. Köhler 2008, 2009

⁸³⁹ vgl. Köhler 2009 S.138f.

⁸⁴⁰ siehe Kapitel 2.5.1

Vielfach mussten Annahmen der Modellbildung zugrunde gelegt werden, die (aus Ressourcengründen) nicht durch Beobachtungen, Versuche oder Simulationsexperimente abgesichert werden konnten. Die in Kapitel 5 vorgestellten Modellierungstechniken und die damit deduktiv abgeleiteten Gestaltungsideen sind jedoch abhängig von der Repräsentativität und Validität dieser Informationen. Nach Einschätzung des Autors ist für diese Untersuchungen ein intensiver Praxisbezug ebenso wie ein disziplinübergreifender Forschungsansatz erforderlich, um die Potenziale der hierzu bereits bestehenden Arbeiten (z. B. XiL⁸⁴¹) ausreizen zu können.

Modellierung funktionsrelevanter Einflussgrößen von Umgebungssystemen

Unmittelbar an das voran genannte Forschungsthema anschließend stellt sich die Frage nach der Modellbildung von Umgebungs-Systemen, die in Wechselwirkung mit einem weiterzuentwickelnden Referenzprodukt stehen. Nach ALBERS werden diese Umgebungs-Systeme mithilfe von *Connectoren* in Contact and Channel Modelle eingebunden, WEBER berücksichtigt sie durch *External Conditions* in CPM-Modellen.⁸⁴² Konkrete Empfehlungen, in welcher Weise die Modelle der Umgebungs-Systeme in Contact and Channel Modelle integriert werden sollten, wurden bislang noch nicht erarbeitet. Eine zukünftige Forschungsarbeit könnte sich mit diesem Thema beschäftigen, etwa im Zuge einer Untersuchung von Techniken zur Verknüpfung mehrerer Partialmodelle (Wirk-Struktur-Modell, Connector-Modelle, Verknüpfung zum Zielsystem etc.).

⁸⁴¹ vgl. Albers 2008b, Düster 2010, Albers 2014b, 2014c

⁸⁴² siehe Kapitel 2.4.2

Literaturverzeichnis

acatech 2012

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2012). Faszination Konstruktion: Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel. Springer, Berlin.

Adamsson 2004

Adamsson N. (2004). Model-based development of mechatronic systems – reducing the gaps between competencies. In: Proceedings of the TMCE 2004 Symposium, Lausanne.

Akao 1992

Akao Y. (1992). QFD. Quality Function Deployment. Wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech.

Albers 2002

Albers A., Matthiesen S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme. Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung; Band 54; Heft 7/8-2002. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf.

Albers 2004

Albers A., Burkardt N., Ohmer M. (2004). Principles of Design on the abstract level of the Contact and Channel Model. In: Proceedings of the TMCE 2004 Symposium, Lausanne.

Albers 2005

Albers A., Burkardt N., Meboldt M., Saak M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED05, Melbourne.

Albers 2006

Albers A., Meboldt M. (2006). A new Approach in Product Development, based on systems engineering and systematic problem solving. AEDS, Pilsen.

Albers 2008a

Albers A., Alink T., Matthiesen S., Thau S. (2008). Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design through the Contact & Channel Model. In: Proceedings of the International DESIGN Conference, Dubrovnik.

Albers 2008b

Albers A., Düser T. (2008). X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In: 8. Tagung Hardware-in-the-Loop-Simulation, Haus der Technik, Kassel.

Albers 2008c

Albers A., Burkardt N., Deigendesch T., Meboldt M. (2008). Enabling Key Competencies by Educational Project Work Exemplified by Teamwork and Cooperation. In: International Conference on Engineering and Product Design Education, EPDE'08, Barcelona.

Albers 2009a

Albers A., Enkler H.-G., Ottnad J. (2009). Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse -- Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact & Channel Model. 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, Paderborn.

Albers 2009b

Albers A., Oerding J., Alink T. (2009). Abstract Objectives Can Become More Tangible With The Contact And Channel Model (C&CM). In: Proceedings of the 19th CIRP Design Conference, Cranfield.

Albers 2010

Albers A., Muschik S. (2010). Development of Systems of Objectives in Early Activities of Product Development Processes. In: International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE, Ancona.

Albers 2011a

Albers A., Sadowski E., Marxen L. (2011). A new perspective on product engineering – overcoming sequential process models. In: *The Future of Design Methodology* (Birkhofer H.). Springer, London.

Albers 2011b

Albers A., Braun A. (2011). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. In: *International Journal of Product Development* (IJPD), DOI: 10.1504/IJPD.2011.043659

Albers 2011c

Albers A., Börsting P., Matthiesen S. (2011). Funktionskatalog zur Unterstützung verteilter und hybrider Produktentstehungsprozesse in der Mikrosystemtechnik. *MikroSystemTechnik - Kongress 2011*, Darmstadt.

Albers 2011d

Albers A., Lohmeyer Q., Ebel B. (2011). Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED11*, Kopenhagen.

Albers 2011e

Albers A., Braun A., Sadowski E., Wynn D.C., Wyatt F., Clarkson P.J. (2011). System Architecture Modeling in a Software Tool Based on the Contact and Channel Approach (C&C-A). *Journal of Mechanical Design* 133:10. DOI: 10.1115/1.4004971.

Albers 2012a

Albers A., Lohmeyer Q. (2012). Advanced Systems Engineering – towards a model-based and human-centered methodology. In: *Proceedings of the TMCE2012 Symposium*, Karlsruhe.

Albers 2012b

Albers A., Ebel B., Lohmeyer Q. (2012). Systems of objectives in complex product development. In: *Proceedings of the TMCE2012 Symposium*, Karlsruhe.

Albers 2013

Albers A., Zingel C. (2013). Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel – Approach (C&C²-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems. In: *Proceedings of the Conference on Systems Engineering Research*, Atlanta.

Albers 2014a

Albers A., Wintergerst E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (Blessing, L.T.M., Chakrabarti, A.). Springer, London.

Albers 2014b

Albers A., Behrendt M., Schille F., Lochmahr M. (2014). Integration of XiL-Techniques at the roller test bench for a maneuver based identification of NVH phenomena. *FISITA 2014 World Automotive Congress*, Maastricht.

Albers 2014c

Albers A., You Y., Klinger S., Behrendt M., Zhang T., Song K. (2014). A new validation concept for future automotive development. *FISITA 2014 World Automotive Congress*, Maastricht.

Albers 2015a

Albers A., Bursac N., Wintergerst E. (2015). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*, Stuttgart.

Albers 2015b

Albers A., Reiß N., Bursac N., Walter B., Gladysz B. (2015). InnoFox – Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*, Stuttgart.

Alink 2010

Alink T. (2010). Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Dissertation, *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, Band 48, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Alt 2009

Alt O. (2009). Car Multimedia Systeme modellbasiert testen mit SysML. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

Andreasen 1980

Andreasen M.M. (1980). Syntesemetoder på Systemgrundlag: bidrag til en konstruktionsteori. Dissertation, Universität Lund.

Araujo 2001

Araujo C.S. (2001). Acquisition of product development tools in industry: a theoretical contribution. Dissertation, Technische Universität Dänemark (DTU).

Backhaus 2008

Backhaus K., Erichson B., Plinke W., Weiber R. (2008). Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin.

Backhaus 2011

Backhaus K., Erichson B., Plinke W., Weiber R. (2011). Fortgeschrittene multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin.

Bär 1998

Bär T. (1998). Einsatz der Feature-Technologie für die Integration von Berechnungen in die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses. Dissertation, Universität des Saarlandes.

Bender 2004

Bender B. (2004). Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, Technische Universität Berlin.

Birkhofer 1980

Birkhofer H. (1980). Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Birkhofer 1991

Birkhofer H. (1991). Methodik in der Konstruktionspraxis – Erfolge, Grenzen und Perspektiven. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED91, Zürich.

Birkhofer 2003

Birkhofer H., Jänsch J. (2003). Interaction between Individuals. In: Lindemann U. (ed.). Human Behaviour in Design – Individuals, Teams, Tools. Springer, Berlin, S.105-110.

Birkhofer 2005

Birkhofer H., Jänsch J., Kloberdanz H. (2005). An extensive and detailed view of the application of design methods and methodology in industry. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED05, Melbourne.

Birkhofer 2009

Birkhofer H., Wäldele M. (2009). The concept of product properties and its value for research and practice in design. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED09, Palo Alto (CA, USA).

Blessing & Chakrabarti 2009

Blessing L.T.M., Chakrabarti A. (2009). DRM, a Design Research Methodology, Springer, London.

Brown 2005

Brown D., Blessing L. (2005). The Relationship between Function and Affordance. In: Proceedings of the ASME 2005 IDETC/CIE Conference, Long Beach, California.

Buch 2007

Buch S. (2007). Strukturgleichungsmodelle: Ein einführender Überblick. Berlin. ESCP-EAP, European School of Management.

Chandrasekaran 2000

Chandrasekaran B., Josephson J. (2000). Function in device representation. Engineering with Computers. Springer, London.

Crilly 2008

Crilly N. Good D., Matravers D., Clarkson P. (2008). Design as communication: exploring the validity and utility of relating intention to interpretation. *Design Studies*, Vol.29:5, S.425-457.

Crosby 1986

Crosby P.B. (1986): *Qualität bringt Gewinn*. Titel der Originalausgabe: *Quality is free. The Art of Making Quality Certain*. Aus dem Amerikanischen übersetzt von Helga Huisgen. McGraw-Hill, Hamburg.

DAKOTA 2013

Adams B.M., Bauman L.E., Bohnhoff W.J., Dalbey K.R., Ebeida M.S., Eddy J.P., Eldred M.S., Hough P.D., Hu K.T., Jakeman J.D., Swiler L.P., Vigil D.M. (2013). DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 5.4 User's Manual. Sandia Technical Report SAND2010-2183.

Davenport 2000

Davenport T.H., Prusak L. (2000). *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. Harvard Business School

Deigendesch 2009

Deigendesch T. (2009). *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 41, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Deubzer 2009

Deubzer F., Lindemann U. (2009). Networked Modelling - Use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED09*, Stanford.

DIN 2330

DIN 2330:2013-07 (2013). *Begriffe und Benennungen - Allgemeine Grundsätze*. Beuth, Berlin.

Dörner 1987

Dörner D. (1987). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. 3. Auflage, Kohlhammer Stuttgart.

Düser 2010

Düser T. (2010). *X-in-the-Loop, ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 47, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Eckert 2003

Eckert C.M., Stacey M.K., Clarkson P.J. (2003). The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED03*, Stockholm.

Eckert 2010

Eckert C.M., Alink T., Albers A. (2010). Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction. In: *Proceedings of the International DESIGN Conference*, Dubrovnik.

Eckert 2011

Eckert C.M., Alink T., Ruckpaul A., Albers A. (2011). Different notions of function: results from an experiment on the analysis of an existing product, *Journal of Engineering Design*, DOI:10.1080/09544828.2011.603297

Eckert 2013

Eckert C.M. (2011). That which is not form: the practical challenges in using functional concepts in design. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 27-03, S.217-231. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/S089006041300022X.

Eekels 2001

Eekels, J. (2001). On the fundamentals of engineering design science: The geography of engineering design science. Part 2. In: *Journal of Engineering Design* 12:3, S.255-281. DOI 10.1080/09544820110055583

Ehrlenspiel 2009

Ehrlenspiel K. (2009). *Integrierte Produktentwicklung*. Hanser, München.

Erden 2008

Erden M., Komoto H., van Beek T., D'Amelio V., Echavarria E., Tomiyama T. (2008). A review of function modelling: approaches and applications. In: *Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 22:02:147-169. DOI: 10.1017/S0890060408000103

Enkler 2010

Enkler H.-G. (2010). Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 44, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Fayyad 1996

Fayyad U.M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. (1996). From data mining to knowledge discovery in databases. In: *AI Magazine* 17:3, S.37-54. DOI: 10.1609/aimag.v17i3.1230.

Feldhusen 2010

Feldhusen J. (2010) Vorlesung „Gestalten als Prozess“ und Skript „Konstruktionslehre 1: Gestalten als Prozess“. RWTH Aachen.

Frankenberger 1997

Frankenberger E. (1997). Arbeitsteilige Produktentwicklung - Empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 291, Technische Universität Darmstadt. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Freudenmann 2014

Freudenmann T. (2014). Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz (C&C²-A). Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 78, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Garvin 1984

Garvin D.A. (1984). What does “product quality” really mean? In: *Sloan Management Review* 26, S.25ff.

Gausemeier 2009

Gausemeier J., Plass C., Wenzelmann C. (2009). Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Hanser, München.

Geis 2008

Geis C., Bierhals R., Schuster I., Badke-Schaub P., Birkhofer H. (2008). Methods in practice – a study on transfer of design methods. In: *Proceedings of the International DESIGN Conference*, Dubrovnik.

Gero 2002

Gero J.S., Kannengiesser U. (2002). The Situated Function-Behaviour-Structure Framework. In: *Artificial Intelligence in Design* S.89-104. DOI: 10.1007/978-94-017-0795-4_5

Giebel 2010

Giebel M. (2010). Wertsteigerung durch Qualitätsmanagement. Entwicklung eines Modells zur beschreibung von Wirkmechanismen und eines Vorgehenskonzepts zu dessen Einführung. Dissertation, Kassel.

Göker 1996

Göker H. M. (1996). Einbinden von Erfahrung in das konstruktionsmethodische Vorgehen. VDI-Verlag, Düsseldorf.

Grabowski 1997

Grabowski H., Geiger K. (1997). Neue Wege zur Produktentwicklung, Raabe, Stuttgart.

Gundlach 2004

Gundlach C. (2004). Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung. Dissertation, Universität Kassel.

Günther 1998

Günther J. (1998). Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess. Dissertation, Technische Universität München (TUM). Shaker, Aachen.

Hacker 1996

Hacker W., Sachse P., von der Weth R. (1996). Denkleistungen beim Konstruieren. VDI-Berichte, Zukunftschance Produktentwicklung, S.137-153.

Hacker 1997

Hacker W. (1997) Improving engineering design - contributions of cognitive ergonomics. In: Ergonomics, 40:10, S.1088-1096. DOI: 10.1080/001401397187621

Hacker 2002

Hacker W. (2002). Denken in der Produktentwicklung. VDF Hochschulverlag, Zürich.

Hannah 2011

Hannah R., Joshi S., Summers J.D. (2011). A user study of interpretability of engineering design representations. In: Journal of Engineering Design 23:6, S.443-468. DOI: 10.1080/09544828.2011.615302

Hansen 1976

Hansen F. (1976). Konstruktionswissenschaft – Grundlagen und Methoden. VEB-Verlag, Berlin.

Hastings 2004

Hastings D., McManus H. (2004). A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems. Engineering Systems Symposium, Cambridge, USA.

Hubka 1984

Hubka V. (1984). Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Springer, Berlin.

Hubka 2002

Hubka V (2002). Specialized design sciences – questions for the future. In: Proceedings of the International DESIGN Conference, Dubrovnik.

Jänsch 2007

Jänsch J. (2007). Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

KEM 2012

Neumann H. (2012). KEM – Zeitschrift für Konstruktion, Entwicklung, Management. Ausgabe März/2012.

Kern 2009

Ken J. (2009). Ishikawa Diagramme - Ursache-Wirkungs-Diagramme. GRIN Verlag, München.

Kesselring 1954

Kesselring F. (1954). Technische Kompositionslehre. Springer, Berlin.

Kirchner 2013

Kirchner F., Michaelis K.T., Hofmeister J., Regenbogen A. (2013). Wörterbuch der philosophischen Begriffe. Meiner, Hamburg.

Kläger 1993

Kläger R. (1993). Modellierung von Produktanforderungen als Basis für Problemlösungsprozesse in intelligenten Konstruktionssystemen. Dissertation. Shaker, Aachen.

Kleppmann 2007

Kleppmann W. (2007). Statistische Versuchsplanung. In: Masing W.: Handbuch Qualitätsmanagement, S.467 - 490, Carl Hanser Verlag, München.

Kleppmann 2011

Kleppmann W. (2011). Taschenbuch Versuchsplanung. Hanser-Verlag, München.

Kleppmann 2013

Kleppmann W. (2013). Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. Hanser-Verlag, München.

Köhler 2008

Köhler C., Conrad J., Wanke S., Weber C. (2008). A matrix representation of the CPM/PDD approach as a means for change impact analysis. In: Proceedings of International DESIGN Conference, Dubrovnik.

Köhler 2009

Köhler C. (2009). Technische Produktänderungen – Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken.

Koller 1994

Koller R. (1994). Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Springer, Berlin.

Kortler 2012

Kortler S., Kohn A., Lindemann U. (2012). Validation of product properties considering a high variety of complex products. In: Proceedings of International DESIGN Conference, Dubrovnik.

Krehmer 2012

Krehmer H. (2012). Vorgehensmodell zum Iterations- und Produktreifegradmanagement in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung. Dissertation, Erlangen.

Lemburg 2009

Lemburg J.P. (2009). Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese. Dissertation, RWTH Aachen.

Liem 2011

Liem A. (2011). How product representation types are perceived at the client's end to facilitate communication and decision making. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED11, Copenhagen.

Lindemann 2001

Lindemann U., Pulm U. (2001). Enhanced systematics for functional product structuring. In: Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design ICED2001, Glasgow.

Lindemann 2009a

Lindemann U. (2009). Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer, Heidelberg.

Lindemann 2009b

Lindemann U., Maurer M., Braun T. (2009). Structural complexity management. Springer, Berlin.

Lohmeyer 2013

Lohmeyer Q. (2013). Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 59, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Matthiesen 2002

Matthiesen S. (2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Band 6, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Matthiesen 2011

Matthiesen S. (2011). Seven years of product development in industry – experiences and requirements for supporting engineering design with 'thinking tools'. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED11, Kopenhagen.

Mayers 1997

Mayers B. (1997). Prozess- und Produktoptimierung mit Hilfe der statistischen Versuchsmethodik. Dissertation RWTH Aachen. Shaker, Aachen.

Meerkamm 1993

Meerkamm H., Krause D., Rösch S., Storath E. (1993). Anforderungen an integrierte Konstruktionssysteme – Auswirkungen auf die Architektur des CAD-Referenzmodells. In: Rechnerunterstützte Wissensverarbeitung in Entwicklung und Konstruktion '93: Tagung Heidelberg; VDI Verlag, Düsseldorf.

Meinl 1990

Meinl F. (1990). Sachmerkmale: Schlüssel zur technischen Gestaltung, Beschreibung und Information. Beuth, Berlin.

Muschik 2011

Muschik S. (2011). Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 50, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Newton 1914

Newton I., Bernoulli D., d'Arcy P. (1914). Abhandlungen über jene Grundsätze der Mechanik, die Integrale der Differenzialgleichungen liefern. In: Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Leipzig.

Ohmer 2008

Ohmer M. (2008). Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Band 32, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Paetzold 2006

Paetzold K. (2006). Ansätze für eine funktionale Repräsentation multidisziplinärer Produkte. Design for X : Beiträge zum 17. DfX-Symposium, S. 61-68. Neukirchen.

Pahl & Beitz 2005

Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H. (2005). Konstruktionslehre: Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer, Berlin.

Pfeifer 2001

Pfeifer T. (2001). Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. Hanser, München.

Pohl 2007

Pohl K. (2007). Requirements Engineering – Grundlagen, Prinzipien, Techniken. dpunkt, Heidelberg.

Ponn 2008

Ponn J., Lindemann U. (2008). Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer, Heidelberg.

Ponn 2011

Ponn J., Lindemann U. (2011). Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer, Heidelberg.

Popov 2009

Popov V. L. (2009). Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. Springer, Berlin.

Prüfer 1982

Prüfer H.-P. (1982). Parameteroptimierung – ein Werkzeug des rechnerunterstützten Konstruierens. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

Pulm 2004

Pulm, U. (2004). Systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung, Dissertation, München.

Redtenbacher 1848

Redtenbacher F. (1848). Resultate für den Maschinenbau. Bassermann Verlag, Mannheim.

Rodenacker 1991

Rodenacker W. (1991). Methodisches Konstruieren. Springer, Berlin.

Roozenburg 1995

Roozenburg N., Eekels J. (1995). Product Design: Fundamentals and Methods. Wiley, Chichester.

Roozenburg 2002

Roozenburg N.F.M. (2002) Defining synthesis: on the senses and the logic of design synthesis. In: Engineering Design Synthesis – Understanding, Approaches and Tools (Chakrabarti A.). Springer, London.

Roth 1982

Roth K. (1982). Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer, Berlin.

Sauter 2011

Sauter C. (2011). Ein Beitrag zur Integration von Wikis und Social Tagging in die Produktentstehung. Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 54, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Schumpeter 1961

Schumpeter J. (1961). Konjunkturzyklen. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.

Seel 2003

Seel N.M. (2003). Psychologie des Lernens. Ernst Reinhard Verlag, München.

Seiffert 2008

Seiffert U. (2008). Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Vieweg und Teuber, Wiesbaden.

Sperlich 1983

Sperlich H. (1983). Das Gestalten im Konstruktionsprozess. Technische Hochschule Ilmenau.

Stacey 2003

Stacey M.K., Eckert C.M. (2003). Against Ambiguity. In: Journal of Computer Supported Cooperative Work 12:2, S.153-183.

Stachowiak 1973

Stachowiak H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Springer, Wien.

Stirzel 2009

Stirzel M. (2009). Controlling von Entwicklungsprojekten. Dargestellt am Beispiel mechatronischer Produkte. Dissertation, Gabler, Universität Stuttgart.

Stone 1999

Stone R., Wood K. (2000). Development of a functional basis of design. In: Journal of Mechanical Design 122:4, S. 359-370. DOI: 10.1115/1.1289637

Suh 1990

Suh N.P. (1990) The principles of design. Oxford University Press, New York.

Suh 1998

Suh N.P. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems. In: Research in Engineering Design, 10:189ff.

Thau 2013

Thau S. (2013). Heuristiken zur Analyse technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 66, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Tschochner 1954

Tschochner H. (1954). Konstruieren und Gestalten. Essen.

Umeda 1990

Umeda, Y. et al. (1990). Function, behaviour, and structure. In: J.S. Gero. Applications of artificial intelligence in engineering, S.177–193. Springer, Southampton, Berlin.

Vajna 1997

Vajna S., Wegner B. (1997). Autogenetische Konstruktionstheorie – Evolutionärer Ansatz einer erweiterten Konstruktionstheorie. In: Meerkamm H. (ed.). Fertigungsgerechtes Konstruieren, S.116-125. Friedrich-Alexander- Universität Erlangen-Nürnberg.

Vajna 2005

Vajna S., Clement S., Jordan A., Bercsey T. (2005). The Autogenetic Design Theory – an evolutionary view of the Design Process. In: Journal of Engineering Design 16:4, S.423-440.

VDI2206 2004

VDI Richtlinie 2206 (2004). Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.

VDI2221 1993

VDI Richtlinie 2221 (1993). Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.

Vermaas 2010

Vermaas P. (2010). Technical functions: towards accepting different engineering meanings with one overall account. In: Proceedings of the TMCE 2010 Symposium, Ancona.

Vollmer 2002

Vollmer G. (2002). Evolutionäre Erkenntnistheorie. Hirzel, Stuttgart.

Ware 2004

Ware C. (2004). Information visualization - perception for design. Elsevier, Amsterdam.

Warell 1999

Warell A. (1999). Introducing a use perspective in product design theory and methodology. In: Proceedings of the ASME 1999 Design Engineering Technical Conferences. Las Vegas, Nevada.

Wanke 2010

Wanke S. (2010). Neue Konzepte zur Verwaltung und Bereitstellung von Lösungen im Produktentwicklungsprozess - CPM/PDD-Lösungsmuster als Grundlage eines verhaltensbeschreibenden Lösungskataloges. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken.

Weber 2000

Weber C., Werner (2000). Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozeßmodells. In: Design for X : Beiträge zum 11. DfX-Symposium, S. 126-143. Universität Erlangen-Nürnberg.

Weber 2001

Weber C., Werner H. (2001). Schlussfolgerungen für "Design for X" aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen. In: Design for X: Beiträge zum 12. Symposium, Neukirchen, S. 37-48. Universität Erlangen-Nürnberg.

Weber 2008

Weber C. (2008). How to derive application-specific design methodologies. In: Proceedings of the International DESIGN Conference, Dubrovnik.

Weber 2011

Weber C. (2011). Design theory and methodology - contributions to the computer support of product development/design processes. In: The future of design methodology S. 91-104. Springer, London.

Weber 2012

Weber C. (2012). Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz. In: Design for X - Beiträge zum 23. DfX-Symposium in Bamberg, S. 25-62. TuTech, Hamburg.

Weber 2014

Weber C. (2014). Modelling Products and Product Development Based on Characteristics and Properties. In: An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations (Blessing, L.T.M.; Chakrabarti, A.). Springer, London.

Wiedner 2013

Wiedner A. (2013). Feldstudie zur Ermittlung der von Konstrukteuren praktizierten Handlungsmuster bei der Funktion-Gestalt-Synthese. Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Band 65, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Wyatt 2009

Wyatt D., Eckert C.M., Clarkson P.J. (2009). Design of product architectures in incrementally developed complex products. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED09, Stanford, USA.

Zangemeister 1976

Zangemeister C. (1976). Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Wittmann, München.

Zingel 2013

Zingel C. (2013). Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Band 70, ISSN1615-8113, Karlsruhe.

Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Nachfolgend sind die durch den Autor im Rahmen der Forschungsarbeit betreuten Abschlussarbeiten auflistet.

Dammert 2014

Dammert B., Betreuer: Wintergerst E., Albers A. (2014). Untersuchung heuristischer und statistischer Verfahren zur Bestimmung des Einflusses der Gestaltausprägung auf die Funktionsqualität technischer Systeme. Bachelorarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Gaede 2013

Gaede O., Betreuer: Sadowski E., Albers A. (2013). Analyse eines Systems zum Öffnen und Schließen von Motorhauben und Optimierung des Koppelhebels. Bachelorarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Herzog 2012

Herzog J., Betreuer: Sadowski E., Albers A. (2012). Analyse und Entwicklung einer sichtoptimierten Bauteil- und Bauraumgestaltung im unteren Bereich der Windschutzscheibe am Beispiel einer Oberklassen-Limousine. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Kubel 2013

Kubel F., Betreuer: Sadowski E., Albers A. (2013). Funktionsorientierte Konstruktion und Gestaltoptimierung eines Restgitter-Hebels. Bachelorarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Leiser 2011

Leiser G., Betreuer: Sadowski E., Matthiesen S. (2011). Qualitative und quantitative Analyse und Beschreibung des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt am Beispiel von Kälteschellen. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Stemmler 2013

Stemmler A., Betreuer: Sadowski E., Albers A. (2013). Machbarkeitsuntersuchung zur pneumatischen Funktionsprüfung eines hydraulischen Druckbegrenzungsventils. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Stürtzel 2012

Stürtzel C., Betreuer: Sadowski E., Matthiesen S. (2012). Qualitative und quantitative Analyse des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt einer selbstpenetrierenden Schraube. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Tian 2011

Tian Q., Betreuer: Sadowski E., Albers A. (2011). Qualitative und quantitative Analyse und Beschreibung des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt am Beispiel rückensteifer Ketten. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Wall 2014

Wall M., Betreuer: Wintergerst E., Albers A. (2014). Quantitative Untersuchung der Sägeblattkinematik von Säbelsägen. Masterarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Weitere studentische Abschlussarbeiten, die nicht vom Autor der vorliegenden Arbeit betreut wurden:

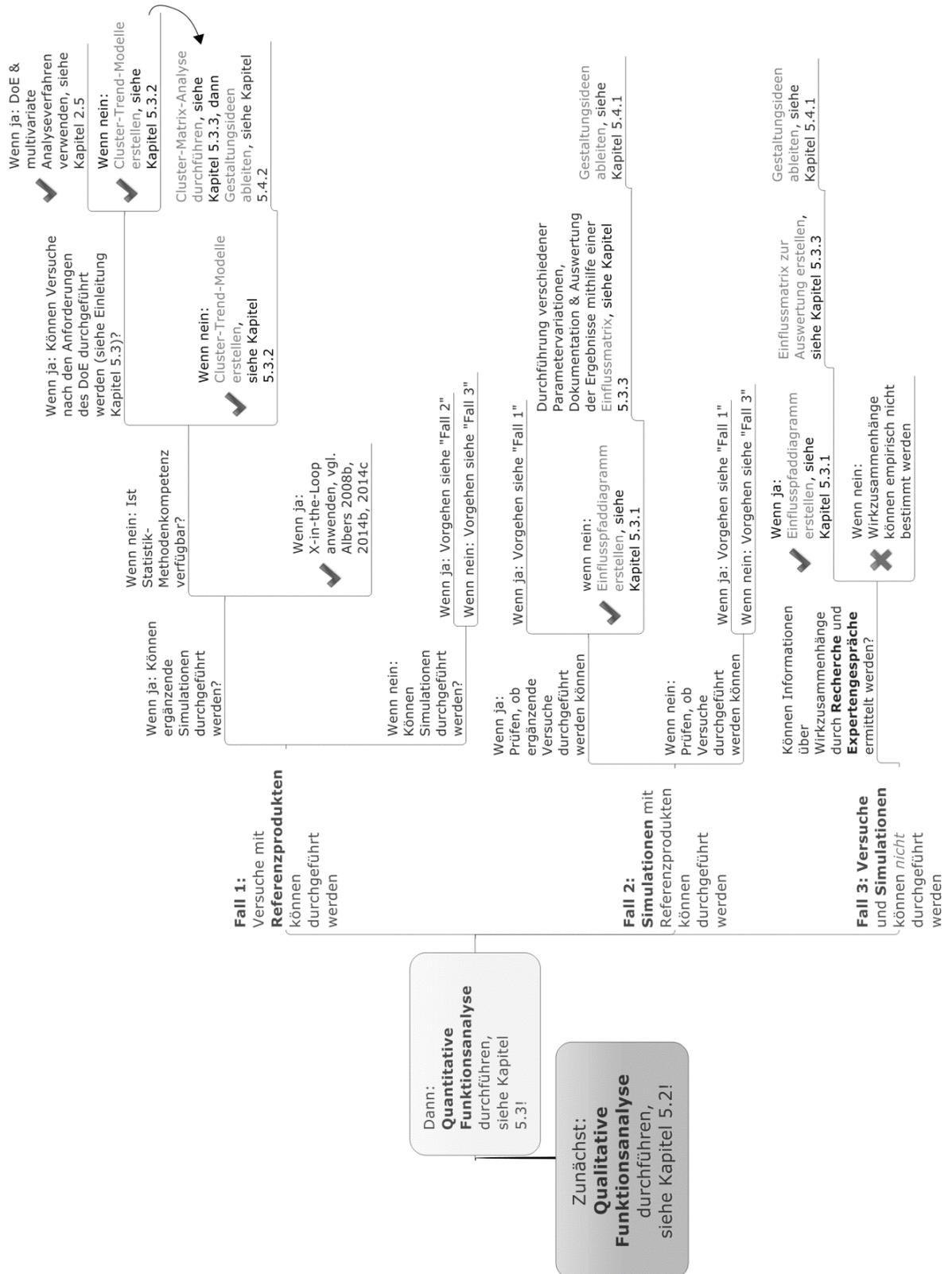
Thau 2006

Thau S., Betreuer: Alink T., Albers A. (2006). Analyse des Zusammenhanges zwischen Geometrie und Funktionserfüllung bei einer Trockenbauschraubenspitze mittels C&CM. Diplomarbeit, IPEK, Universität Karlsruhe (TH).

Serf 2013

Serf M., Betreuer: Braun A., Wiedner A., Matthiesen S. (2013). Konzeptentwicklung zur Optimierung der Schlagwerkscharakteristik eines Bohrhammers unter Anwendung des iPeM und C&C²-A. Diplomarbeit, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Anhang 1: Auswahl von Methoden und Modellierungstechniken



Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Eike Wintergerst, geb. Sadowski
Geburtsdatum: 5. September 1984
Geburtsort: Filderstadt
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet

Schulbildung, Studium, Promotion

2010 – 2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Seit 11/2011 Leiter der Forschungsgruppe „Entwicklungsmethodik und -management“ am IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

2009 Diplomarbeit am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der University of Cambridge, England

2007 – 2009 Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

2006 – 2007 Auslandsstudium Maschinenbau an der Shanghai Jiao Tong University, China

2005 – 2006 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Werkstoffkunde IWK1, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

2004 – 2009 Maschinenbau-Studium, Vertiefungsrichtung Produktentwicklung und Konstruktion am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

1995 – 2004 Quenstedt Gymnasium Mössingen