



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Produktentwicklung

Planungsleitfaden für die systematische Analyse- und Verbesserung von Produktarchitekturen

Charalampos Daniilidis

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Veit St. Senner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Die Dissertation wurde am 14.03.2016 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 16.01.2017 angenommen.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Problemstellung

Die steigende Produktindividualisierung und der stetig zunehmende globale Wettbewerbs- und Kostendruck stellen produzierende Unternehmen technischer Produkte vor neue Herausforderungen. Die Produktarchitektur stellt dabei ein zentrales Element dar, um negative Trends entgegenzuwirken, der Forderung nach einer höheren externen Variantenvielfalt gerecht zu werden und die operative Effektivität zu verbessern.

Dabei existieren unterschiedliche Methoden und Ansätze, um eine Produktarchitektur systematisch zu analysieren und Verbesserungspotenzial in der Produktstruktur zu erkennen. Die jeweilige Situation, in der sich ein Unternehmen befindet, spielt dabei eine maßgebliche Rolle. Sowohl die Art der Produktarchitektur als auch die Methoden zur Analyse und Verbesserung werden von dieser Situation beeinflusst.

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, dem Produktarchitekten eine Systematik für die Analyse und Erkennung vom Verbesserungspotenzial abhängig von der jeweiligen Situation anzubieten. Hierzu wird eine Vorgehensweise entwickelt, die den Produktarchitekten durch die Auswahl geeigneter Ansätze für die Produktarchitekturgestaltung unterstützt. Außerdem soll dieses Vorgehen eine situationsgerechte Methoden- und Maßnahmenauswahl unterstützen. Dafür werden schrittweise folgende Faktoren behandelt: die systematische Analyse der Ausgangssituation, die Zielsetzung und der Umfang der Analyse und die relevanten Perspektiven und -ebenen für die Analyse der Produktarchitektur.

Ergebnisse

Es wird ein Ansatz vorgestellt, der verschiedene Aspekte der Analyseplanung und der situationsgerechten Methodenauswahl abdeckt und unterstützt. Ausgehend von einer systematischen Situationsbeschreibung mittels definierter Situationsmerkmale wird die Zielsetzung des Analysevorhabens konkretisiert. Daraus kann der strategische Ansatz für die Gestaltung der Produktarchitektur abgeleitet werden. In den nächsten Schritten sind die Analyseaufgabe abzugrenzen und die relevanten Perspektiven für die Analyse der Produktarchitektur zu definieren. Diese Informationen werden im Anschluss für die Methodenauswahl verwendet.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise wird an drei Fallstudien aus der industriellen Praxis angewendet. Diese Fallstudien stellen drei unterschiedliche Situationen für die Vorgehensweise dar, um den generischen Charakter des Ansatzes zu demonstrieren. Dabei werden in den Fallstudien die Gestaltung modularer Produktfamilien, die Standardisierung sowie die Baukastenentwicklung untersucht.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Die Gestaltung der Produktarchitektur bei produzierenden Unternehmen technischer Produkte stellt einen maßgeblichen Stellhebel für den Unternehmenserfolg und für eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit dar. Der Ansatz dieser Arbeit ist ein Leitfaden, um den Produktarchitekten situationsgerecht durch die Analyse und Verbesserung der Produktarchitektur zu navigieren. Wichtige Themen dabei sind die Analyse der konkreten Situation, die Definition eines strategischen Ansatzes für die Gestaltung der Produktarchitektur sowie die Auswahl geeigneter Methoden, um dieses Ziel zu erreichen. Die Anwendung der Vorgehensweise beschränkt sich dabei nicht auf die durchgeführten Fallbeispiele. Der abstrakte Charakter des Ansatzes erlaubt die Anwendung auch für weitere Situationen, wie sie im industriellen Umfeld zu finden sind.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

In dieser Arbeit wird die Aufgabe der Produktarchitekturanalyse und -gestaltung in dem Kontext mit der Unternehmenssituation gebracht. Es wird gezeigt, dass für die Auswahl einer geeigneten Produktarchitekturart die Berücksichtigung der jeweiligen Situation notwendig ist. Dabei wird die Situationsanalyse auf Basis von definierten Situationsmerkmalen aus dem Bereich des *engineering design* durchgeführt. Für eine detailliertere Situationsbeschreibung ist die Betrachtung weiterer Forschungsfelder erforderlich.

Garching, April 2017

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
TUM Emeritus of Excellence
Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München vom März 2008 bis März 2013. Erstens möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen, die Betreuung meiner Arbeit sowie für das geschaffene konstruktive und kreative Umfeld bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann herzlich bedanken. Durch die geschaffenen Gestaltungsfreiräume und die angebotenen vielfältigen Möglichkeiten hinsichtlich Forschungsprojekte und Lehretätigkeiten am Lehrstuhl für Produktentwicklung konnte ich mich sowohl beruflich als auch persönlich entfalten und weiterentwickeln.

Für die Zweitberichterstattung möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen herzlich bedanken. Insbesondere bedanke ich mich für den Aufwand und die konstruktive Diskussion meiner Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Veit Senner möchte ich für die reibungslose Prüfungsorganisation und -durchführung danken.

Ein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Produktentwicklung. Sie haben die Tätigkeit am Lehrstuhl sowohl auf fachlicher als auch auf menschlicher Ebene bereichert und waren die besten Diskussionspartner für wissenschaftliche Themen. Insbesondere möchte ich mich bei Dr. Wolfgang Bauer, Dr. Fatos Elezi, Dr. Katharina Kirner und Danilo Schmidt für den fachlichen Austausch, die kritischen Diskussionen und die stets gute Zusammenarbeit in Projekten und Lehre bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei den zahlreichen Studentinnen und Studenten bedanken, die mich durch ihre Studienarbeiten bei verschiedenen Themen dieser Arbeit unterstützt haben.

Außerdem danke ich meine Freunde dafür, dass sie meine Freizeit mit weiteren Themen und Aktivitäten bereichert haben. Stellvertretend möchte ich an dieser Stelle Dr. Ilias Dimomeletis, Dr. Kimon Karras, Akis Kipouridis, Theodoros Papadopoulos, Panagiotis Symvoulidis und Dr. Iason Vittorias für die Diskussionen und außerfachlichen Anmerkungen zu meiner Arbeit danken.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie in Griechenland herzlich bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben hat in Deutschland zu studieren und mich stets und ausnahmslos unterstützt und motiviert hat. Ein besonderer Dank gilt hier auch meiner Ehefrau Kyriaki, die mir während der intensiven letzten Phase der Verfassung meiner Arbeit den Rücken gestärkt hat, mich motiviert hat und bei der Korrektur der Arbeit maßgeblich unterstützt hat. Ohne sie wäre der erfolgreiche Abschluss nicht möglich gewesen.

München, März 2017

Charalampos Daniilidis

*στον Γιαννίκο και την Κυριακή,
στους γονείς μου*

Folgende Publikationen sind Teil dieser Arbeit:

DANIILIDIS et al. 2009

Daniilidis, C.; Eben, K.; Lindemann, U.: A functional analysis approach for product reengineering. TRIZfuture Conference 2009. Timisoara, Rumänien, 2009.

EBEN et al. 2009

Eben, K.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Problem solving for multiple product variants. TRIZfuture Conference 2009. Timisoara, Rumänien, 2009.

DANIILIDIS et al. 2010

Daniilidis, C.; Eben, K.; Deubzer, F.; Lindemann, U.: Simultaneous modularization and platform identification of product family variants. 8th NordDesign Conference. Göteborg, Sweden, 25.-27.08.2010 2010.

BAUER et al. 2011

Bauer, W.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Approach for a modularization driven system definition using multiple domains. 13th International DSM Conference. Cambridge, MA, USA, 14.-15.09.2011 2011.

DANIILIDIS et al. 2011a

Daniilidis, C.; Enßlin, V.; Eben, K.; Lindemann, U.: A classification framework for product modularization methods. 18th International Conference on Engineering Design. Copenhagen, Denmark, 15.-18.08.2011 2011a.

DANIILIDIS et al. 2012a

Daniilidis, H.; Bauer, W.; Eben, K.; Lindemann, U.: Compendium for modular and platform based architecting. Conference on Systems Engineering Research (CSER). St. Louis, MO, USA, 19-22.03.2012 2012a.

DANIILIDIS et al. 2012b

Daniilidis, H.; Bauer, W.; Eben, K.; Lindemann, U.: Systematic goal definition for complexity management projects. IEEE International Systems Conference. Vancouver, B.C., Canada, 19-22.03.2012 2012b.

DANIILIDIS et al. 2011b

Daniilidis, H.; Hellenbrand, D.; Bauer, W.; Lindemann, U.: Using Structural Complexity Management for Design Process Driven Modularization. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, 06.-09.12.2011 2011b.

DANIILIDIS et al. 2012c

Daniilidis, H.; Kaiser, K.; Thalmeier, M.; Vogt, S.; Steinhoff, G.; Respondek, M.; Espertshuber, R.; Mitter, A.; Steinberg, H.; Mayer, U.; Lindemann, U. (Hrsg.): LEIKO Abschlussbericht 2012: Leiter und Kontaktierung zukünftiger Elektrofahrzeugbordnetze. Kooperationsprojekt gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, München (2012c).

DANIILIDIS & LINDEMANN 2012

Daniilidis, H.; Lindemann, U.: Assembly process driven product architecting. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) Hong Kong, 2012.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1 Komplexität und Produktarchitektur	1
1.1.1 Ursachen und Quellen der Komplexität in Produkten	3
1.1.2 Produktarchitektur technischer Produkte	5
1.1.3 Bedeutung der Variantenvielfalt für die Produktentwicklung	7
1.2 Problembeschreibung	10
1.3 Ziele der Arbeit	15
1.3.1 Forschungsfrage und Schwerpunkt der Arbeit	16
1.4 Thematische Einordnung der Arbeit	17
1.5 Forschungsmethodik	19
1.6 Struktur der Arbeit	20
2. Theoretische Grundlagen	23
2.1 Beschreibungsmodelle und Vorgehensweisen in der Produktentwicklung	23
2.2 Definitionen und Grundlagen zur Produktarchitektur	28
2.3 Arten von Produktarchitekturen	31
2.3.1 Integralarchitektur	32
2.3.2 Differenzialarchitektur	33
2.3.3 Eingriffsmöglichkeiten auf die Produktarchitektur	44
3. Stand der Forschung	49
3.1 Relevante Ansätze in der Produktentwicklung	49
3.1.1 Komplexität beherrschen und Transparenz schaffen	49
3.1.2 Strukturelles Komplexitätsmanagement	50
3.1.3 Variantenmanagement in der Produktentwicklung	54
3.2 Analysemethoden von Produktarchitekturen	58
3.2.1 Modularisierungsmethoden und –ansätze	59
3.2.2 Erkennung von Verbesserungspotential	69

4. Systematisches Vorgehen zur Analyse von Produktarchitekturen	75
4.1 Situation analysieren	76
4.2 Analyseziel planen und Ansatz bestimmen	77
4.3 Analyse abgrenzen	80
4.4 Methoden auswählen und Methodik entwickeln	82
4.5 Analyse durchführen	88
5. Fallstudien zur Demonstration und Erläuterung der Vorgehensweise zur systematischen Analyse von Produktarchitekturen	91
5.1 Fallstudie 1: Erkennung von Potentialen in der Produktarchitektur von Wasserheizgeräten	91
5.2 Fallstudie 2: Neuentwicklung einer Produktfamilie von Hochvolt-Aluminiumsteckern	100
5.3 Fallstudie 3: Standardisierung und Baukastenentwicklung im Produktprogramm von pneumatischen Ventilen	108
5.4 Evaluation des Vorgehens und Diskussion der Projektergebnisse	116
5.4.1 Diskussion der durchgeführten Fallstudien und Reflexion der Vorgehensweise	116
5.4.2 Evaluation und Diskussion des Vorgehens hinsichtlich der gestellten Forschungsziele	118
5.4.3 Schlussfolgerungen und Reflexion des Vorgehens	118
6. Zusammenfassung und Ausblick	121
6.1 Zusammenfassung	121
6.2 Ausblick	122
7. Anhang	125
7.1 Erfahrungsgrundlage des Autors	125
7.2 Betreuung relevanter Studienarbeiten durch den Autor	126
7.3 Fallstudie 2: Neuentwicklung einer Produktfamilie von Hochvolt-Aluminiumstecker	127
8. Literaturverzeichnis	129
9. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung	143

1. Einleitung

Der Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt in den letzten Jahrzehnten, die daraus resultierende Produktindividualisierung und Heterogenisierung der Nachfrage sowie der globale Wettbewerbsdruck und kürzere Produktlebenszyklen stellen produzierende Unternehmen vor neue und stetig ändernde Herausforderungen (LINDEMANN et al. 2002, SCHUH 2005). Aufgrund der starken Kundenorientierung und des Bedarfs an individualisierten Produkten sinken der Standardisierungsgrad und die produzierenden Stückzahlen. Folglich erhöht sich die Variantenvielfalt von Produkten und Prozessen, die eine höhere Komplexität im Unternehmen hervorruft (WILDEMANN 1998). Zudem werden die Produkte, Produktionsprozesse, Organisationsstrukturen und Märkte zunehmend undurchsichtiger und intransparenter und erfordern daher neue Strategien und Methoden in der Produktentwicklung (LINDEMANN 2009).

Die Unternehmen müssen sich unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen, der eigenen Kernkompetenzen und des Wettbewerbs strategisch am Markt positionieren. Allein aber die Aufstellung und Verfolgung einer marktkonformen Positionierungsstrategie ist nicht ausreichend, um einen nachhaltigen Unternehmenserfolg zu gewährleisten. Nur durch das gleichzeitige und kontinuierliche Streben nach operativer Exzellenz und Beherrschung der Komplexität kann ein Unternehmen seine Effizienz und Anpassungsfähigkeit an die stetig ändernden Bedingungen sicherstellen.

Für Unternehmen wird es somit immer wichtiger, neue strukturierte Herangehensweisen zur Beherrschung und Reduzierung der Komplexität zu entwickeln und den Umgang mit der Komplexität fest in den Entwicklungsprozessen zu integrieren. Ein möglicher Ansatz dafür stellt die Entwicklung situationsgerechter Produktarchitekturen, wie zum Beispiel die Einführung von Baukasten- und Plattformstrategien, und die damit verbundene Schaffung von Transparenz dar. Dafür ist eine neue systematische Vorgehensweise zur situationsgerechten Analyse von Produktarchitekturen und zur Erkennung von Verbesserungspotenzial notwendig. Ziel dieser Arbeit ist einen Leitfaden zur Planung und Durchführung von Analyseprojekten unter Berücksichtigung der jeweiligen Situation vorzustellen.

In den folgenden Abschnitten werden die relevanten Begriffe und Zusammenhänge für die genaue Beschreibung der Ausgangssituation und Problemstellung der vorliegenden Arbeit näher erläutert. Darauf aufbauend wird die konkrete Zielsetzung der Arbeit vorgestellt.

1.1 Komplexität und Produktarchitektur

Die Komplexität wird als Begriff in den letzten Jahrzehnten von vielen unterschiedlichen Disziplinen, wie beispielweise *engineering design* und Sozialwissenschaften verwendet. Folglich existiert eine Vielzahl an verschiedenen Definitionen für Komplexität (WEBER 2005). Im Rahmen dieser Arbeit sind die technischen und insbesondere die für das *engineering design* relevanten Definitionen von Relevanz. Hierbei handelt es sich um die Komplexität der Struktur eines Systems. Dieses System kann sowohl ein technisches Produkt sein als auch die Prozesse

zur Entwicklung und Herstellung dieses Produktes sowie die Organisationsstruktur, die das Produkt und den Prozess verantwortet.

System

Ein System besteht nach ULRICH et al. (2001) aus Systemelementen, die die Bausteine des Systems darstellen, und Relationen zwischen den Systemelementen. Diese Relationen bestimmen und beeinflussen das Verhalten des Systems. Darüber hinaus definieren HABERFELLNER (2002) und LINDEMANN (2009) eine Systemgrenze, die das System von seinem Umfeld abgrenzt, wie auch In- und Output Beziehungen zum Umfeld als weitere Bestandteile und Charakteristika eines Systems. „Dabei ist ein System nie unabhängig, sondern weist Wechselwirkungen mit seinem Umfeld auf“. Des Weiteren beschreibt LINDEMANN (2009), dass ein System auf unterschiedlichen Abstraktions- und Detailierungsebenen existiert. Das bedeutet, dass sowohl die funktionale Struktur eines Produktes als auch dessen Baustruktur als System betrachtet werden kann. Dabei können Teile dieses Produktes beispielweise als untergeordnete Systeme verstanden werden. Beim Systembegriff ist es zweckmäßig sich von der Ausprägung der Elemente zu lösen und nur eine formale graphentheoretische Darstellung, wie in Abbildung 1-1, vor Augen zu haben (HABERFELLNER 2002).

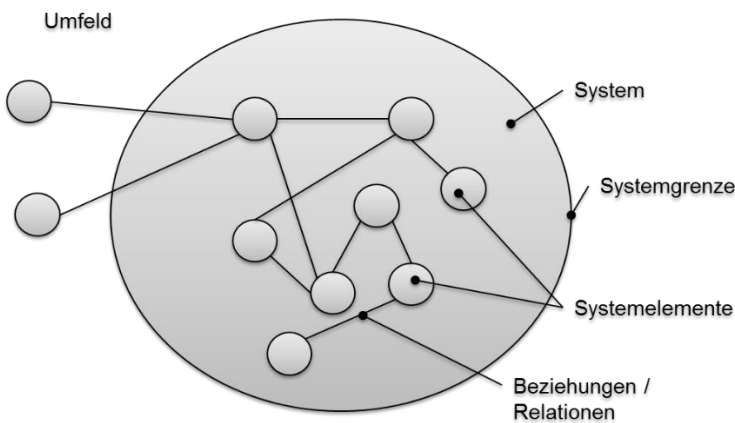


Abbildung 1-1: Graphentheoretische Darstellung von einem System mit dessen Bestandteilen

Struktur

Darauf aufbauend wird der Begriff „*Struktur*“ eines Systems erläutert und definiert. Unter Struktur eines Systems wird die Ordnung zwischen den Bausteinen des Systems, den Systemelementen mit deren Relationen, verstanden (LINDEMANN 2009, MALIK 2003, HABERFELLNER 2002). Stellt das System die physische Ebene eines Produktes dar, spricht man von der Produkt- oder Baustruktur. Dabei beschreibt die Produktstruktur den prinzipiellen Aufbau eines Produktes anhand seiner physischen Komponenten und deren Abhängigkeiten miteinander. Eine Erweiterung der Produktstruktur stellt die Produktarchitektur dar, die den Zusammenhang zwischen den Produktfunktionen, den physischen Komponenten und deren Schnittstellen beschreibt (s. Kap. 1.1.2).

Komplexität

Für Komplexität existiert keine allgemein gültige Definition, weil der Begriff bei vielen unterschiedlichen Disziplinen verwendet wird und je nach Anwendungsgebiet verschiedene Bedeutungen hat (WEBER 2005, S. 2). Für die Produktentwicklung beschreibt LINDEMANN (2009) Komplexität als eine messbare Eigenschaft eines Systems.

SCHUH (2005) bestimmt die Komplexität durch die „Anzahl und Verschiedenheit der Elemente und Relationen, die in diesem System vorkommen. Darüber hinaus hängt die Komplexität von der Veränderlichkeit im Zeitablauf ab, die sich ihrerseits durch die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente und durch die Veränderlichkeit der Wirkungsabläufe zwischen Elementen ausdrückt“. LINDEMANN (2009) ergänzt noch die Ungleichmäßigkeit der Aufteilung von Elementen und Relationen als Merkmal der Komplexität und fasst die „Verhaltensmöglichkeiten“ als Art und Anzahl der möglichen Zustände, die ein System einnehmen kann.

Ähnlich definiert FEES (2011) die Komplexität als „die Gesamtheit aller voneinander abhängigen Merkmale und Elemente, die in einem vielfältigen aber ganzheitlichen System stehen. Unter Komplexität werden die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente und die Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe verstanden (PROBST & ULRICH 1988). Komplexität ist durch Anzahl und Art der Elemente und deren Relationen untereinander bestimmbar. Komplexe Prozesse¹ weisen eine *Eigendynamik* auf und sind meist irreversibel, so dass Handlungen nicht rückgängig gemacht werden können“. Deswegen ist die *Intransparenz* für den Entscheider ein wichtiges Merkmal komplexer Systeme. „Er hat keine Möglichkeit, das Netzwerk zirkulärer Kausalität intuitiv zu erfassen, keine Möglichkeit exakter Modellierung und exakter Prognosen, er muss mit Überraschungen und Nebenwirkungen rechnen“ (FEES 2011).

Im Rahmen dieser Arbeit spielt Komplexität in Beziehung zur Produktarchitektur eine wichtige Rolle. Sie dient dem Verständnis der Motivation und der Hintergründe für diese Arbeit, stellt aber keinen Forschungsgegenstand dar. Folglich werden im nächsten Kapitel die Ursachen und Treiber der Komplexität in Produktenarchitekturen näher erläutert.

1.1.1 Ursachen und Quellen der Komplexität in Produkten

Nach MARTI (2007) haben zwei verschiedene Arten von Komplexität Einfluss auf ein Produkt: die externe und die interne Komplexität. Das Unternehmen muss ein Produkt entwickeln und produzieren, das exakt auf die Kundenanforderungen ausgerichtet ist. Dadurch entsteht im Unternehmen, das seinen individuellen Entwicklungsprozess besitzt und dessen Abläufe auf die Befriedigung dieser Bedürfnisse ausgelegt sind, Komplexität. Die externe Komplexität ist die Summe der auf ein Unternehmen einwirkenden externen Faktoren, die interne Komplexität die Übersetzung dieser Markt- und Kundenbedürfnisse in ein physisches Produkt, wobei ein

¹ Als Prozess wird die ausgeführte Menge von Handlungen beschrieben. Jeder Prozess oder Prozessschritt besteht aus einer Eingangssituation (Input) und einem Ziel (Output), das mit Hilfe von Ressourcen erreicht werden soll (LINDEMANN 2009).

Produkt sowohl im ursprünglichen Sinne als auch als Service bzw. Dienstleistung zu verstehen ist (siehe Abbildung 1-2). Eine ähnliche Kategorisierung für Komplexität definiert auch SCHUH (2005), der zwischen der endogenen und exogenen Komplexität unterscheidet.

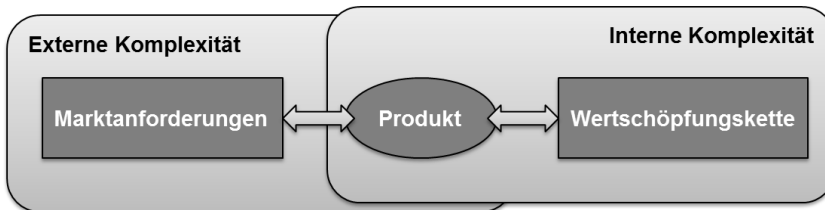


Abbildung 1-2: Externe und interne Komplexität (MARTI 2007)

Für externe und interne Komplexität lassen sich aus Unternehmenssicht vier wesentliche Quellen finden (s. Abbildung 1-3) (LINDEMANN et al. 2009).

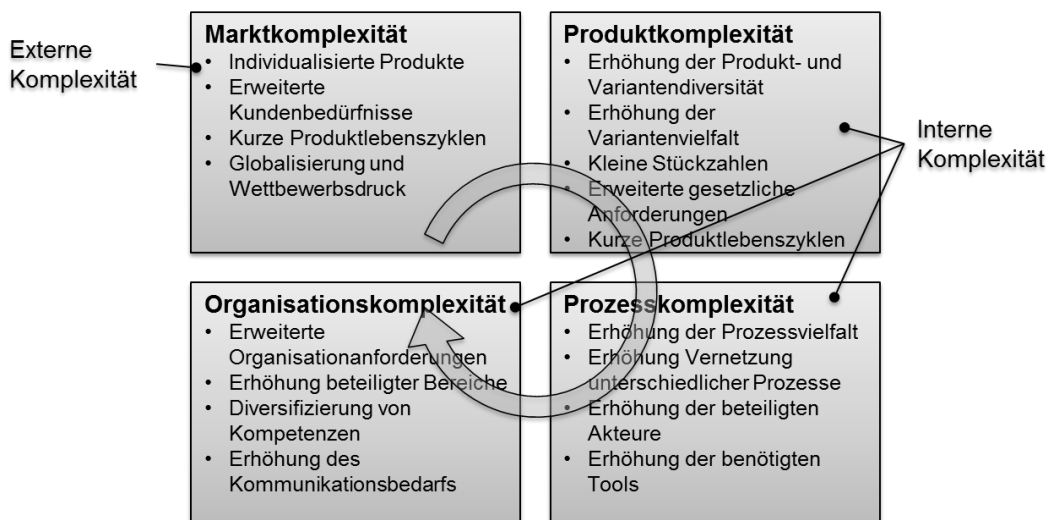


Abbildung 1-3: Komplexitätsbereiche (LINDEMANN et al. 2009)

Bei der externen Komplexität sind Faktoren gemeint, die nicht direkt vom Unternehmen beeinflusst werden können, insbesondere der Markt. Darunter versteht man nicht nur die erhöhten und sich schnell wandelnden Kundenbedürfnisse, die zur verkürzten Produktlebenszyklen führen, sondern den globalen Wettbewerbsdruck sowie Anforderungen und Normen aus der Gesetzgebung der unterschiedlichen Absatzmärkte (SCHUH 2005). Dementsprechend besitzt der Markt einen dominierenden Einfluss auf die Komplexität des Produktes (MAURER 2007, RENNER 2007).

Die interne Komplexität wird nach LINDEMANN et al. (2009) und EHRENSPIEL (2009) in drei Bereichen unterteilt: Produkt-, Prozess- und Organisationskomplexität. Die Produktkomplexität beschreibt die physische und funktionale Komplexität des Produktes und

der dazugehörigen Varianten. In diesem Sinne stellt die Produktkomplexität auch die hauptsächliche Betrachtungsdomäne dieser Arbeit dar.

Ein weiterer Ursprung interner Komplexität und Variantenvielfalt sind die Prozesse im Unternehmen, beispielsweise Forschung und Entwicklung, Produktion, Änderungsprozesse, etc. Zunehmende Arbeitsteilung, verkürzte Entwicklungszeiten und eine größere Vernetzung der Prozesse führen auch hier zu einem Anstieg der Komplexität (LUGO-MÁRQUEZ et al. 2015).

Eng mit den Prozessen und der Produktarchitektur verzahnt ist die Organisationsstruktur. Eine zunehmende Anzahl der beteiligten Mitarbeiter und Unternehmensbereiche sowie die Erhöhung benötigter Kompetenzen erschweren die Kommunikation und die Transparenz von Abläufen und Zuständigkeiten (GÖPFERT 2009).

Zusammenfassend sind die Ursachen der internen Komplexität eines Unternehmens die Vielfalt an Produkt- und Bauteilvarianten, die physische und funktionale Struktur der Produkte, die gewählten Organisationsformen in der Entwicklung bis hin zur Produktion sowie die Entwicklungs- und Fertigungstiefe und die Zahl der Lieferanten (ADAM & JOHANNWILLE 1998).

Diese Komplexitätsaspekte sind eng miteinander verknüpft (SCHUH 2005, LINDEMANN et al. 2009). Auf diese Weise hat eine Erhöhung der Komplexität der Produktarchitektur durch Zunahme der Produktvarianten oder der realisierten Funktionalitäten einen Einfluss auf den Montageprozess. Umgekehrt, beeinflussen die Unternehmensprozesse in der Entwicklung die Komplexität der Produktarchitektur indem durch fehlende Transparenz unnötige Komponentenvarianten entstehen (WILDEMANN 1998).

Eine isolierte Betrachtung und Analyse der Produktarchitektur, um Transparenz zu schaffen und eventuelle Verbesserungspotentiale zu erkennen, würde also nicht die Realität entsprechen und zielführend sein. Außerdem muss durch eine ganzheitliche Betrachtung die Anwendbarkeit eventueller Maßnahmen zur Reduzierung oder Beherrschung der Komplexität von Produktarchitekturen sichergestellt werden. Aufgrund dessen stellt bei dieser Arbeit die Festlegung der Einflussfaktoren auf die Produktarchitektur den ersten Schritt der Planungs- und Analysemethodik dar.

Trotz der meist negativen Konnotation hat Komplexität in der Produktentwicklung nicht nur Nachteile. Vielmehr kann durch Produkt- und Variantenvielfalt ein breiterer Kundenstamm angesprochen und die Kundenbedürfnisse individuell befriedigt werden (MAURER 2007, S.18). Außerdem kann durch Komplexität und Kenntnis der Produktarchitektur eine technische Barriere gegen Produktpiraterie geschaffen werden, da das Produktplagiat schwierig zu erstellen ist und damit unrentabel wird. (WILDEMANN et al. 2007, S.49ff).

1.1.2 Produktarchitektur technischer Produkte

Die Produktarchitektur stellt einen besonderen Einflussfaktor für die Produktkomplexität, die Gestaltung von Unternehmensprozessen und Organisationseinheiten dar. Entscheidungen über die Produktarchitektur müssen in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses getroffen werden. Diese haben Einfluss auf die Gesamtleistung des Unternehmens und daher

ist die Wahl einer geeigneten Produktarchitektur für den Erfolg des Unternehmens ausschlaggebend (ULRICH 1995).

Die Produktarchitektur wird von ULRICH (1995) als die Art der Zuordnung von funktionalen Produktelementen (Funktionen) zu den einzelnen physischen Komponenten, aus denen das Produkt aufgebaut ist, definiert. Demzufolge und im Gegensatz zur Definition der Produktstruktur, beinhaltet die Produktarchitektur nicht nur die physischen Komponenten mit deren Schnittstellen sondern auch die funktionale Perspektive (ULRICH 1995). Eine ähnliche Definition für die Produktarchitektur liefern ebenfalls PAHL & BEITZ (2006) (siehe Abbildung 1-4). Dabei wird auch die progressive Aufteilung vom Gesamten bis auf der Elementarebene deutlich (GÖPFERT 2009).

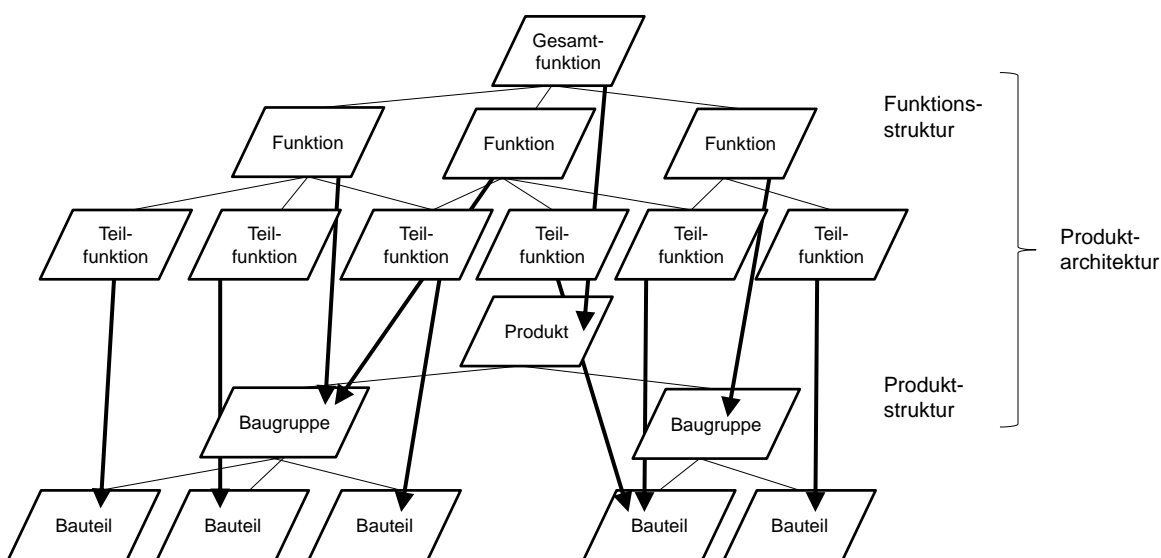


Abbildung 1-4: Hierarchische Darstellung der relevanten Betrachtungsdomänen einer Produktarchitektur (in Anlehnung an PAHL et al. 2006)

Die Produktarchitektur umfasst also nicht nur die Dimension vom Abstrakten (Funktionen) zum Konkreten (Komponenten) sondern auch vom Groben (Produkt) zum Detail (Komponenten).

Aus Kapitel 1.1.1 und den vorherigen Definitionen zur Produktarchitektur wird deutlich, dass die Produktarchitektur in einem großen Maß der Produktkomplexität entspricht. Im Kontext dieser Arbeit wird der Begriff der Produktarchitektur breiter verwendet und umfasst ebenso die Variantenstruktur auf Bauteil- und Produktebene. Dadurch wird eine holistische Betrachtung unter dem Begriff der Produktarchitektur ermöglicht. Ähnlich kategorisiert der WEBER (2005) die Produktkomplexität in drei Kategorien:

- Numerische Komplexität: Anzahl von Systemelementen
- Relationale/strukturelle Komplexität: Anzahl der Relationen zwischen den Systemelementen
- Variationskomplexität: Anzahl der verschiedenen Varianten im System

Wie in Abbildung 1-5 gezeigt wird, umfasst die Produktarchitektur im Rahmen dieser Arbeit folgende relevante Betrachtungsdomänen:

- Funktionen und die funktionale Struktur des Produktes
- Komponenten und die physischen Schnittstellen zwischen den Komponenten
- Varianten der Komponenten und die daraus resultierenden Produktvarianten

Diese Domänen sind eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Auf diese Weise wird beispielsweise die Einführung einer neuen Funktionalität zur Erfüllung eines aktuellen Kundenwunsches einen Einfluss auf die physische Ebene haben und die Erhöhung der Variantenanzahl bewirken.

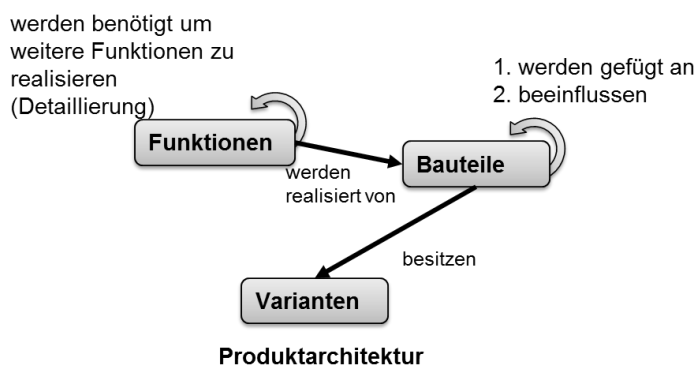


Abbildung 1-5: Relevante Betrachtungsdomänen einer Produktarchitektur mit deren Abhängigkeiten im Kontext dieser Arbeit

1.1.3 Bedeutung der Variantenvielfalt für die Produktentwicklung

Die Vielfalt an Varianten in einem Unternehmen besitzt eine immer steigende Bedeutung und einen hohen Stellenwert für den wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens. Einerseits ist eine hohe externe Varianz notwendig, um eine optimale Marktabdeckung zu ermöglichen, andererseits stellt eine hohe Variantenvielfalt einen großen Kostentreiber innerhalb eines Unternehmens dar (SCHUH & SCHWENK 2001, ULRICH 1995, FRIEDRICH et al. 2015). Dabei sind Komplexität und Vielfalt eng miteinander verknüpft (siehe Kap. 1.1.1) (KESPER 2012, SCHUH & SCHWENK 2001). Bezeichnet Komplexität eine Systemeigenschaft, so ist die Variantenvielfalt eine der dazugehörigen Maßeinheiten (SCHUH 2005). Steigt die externe Variantenvielfalt eines Unternehmens, also die Vielfalt der auf dem Markt angebotenen Produkten (vgl. KERSTEN 1999, S. 158), nimmt die interne Variantenvielfalt des Unternehmens, also die Vielfalt an Bauteilen und Prozessen, zu und ruft eine Komplexitätssteigerung hervor (PONN & LINDEMANN 2011, RENNER 2007, WILDEMANN 2005, PILLER & WARINGER 1999). Darüber hinaus, ist eine erhöhte Variantenvielfalt mit einem höheren Aufwand für die Absicherung der jeweiligen Varianten verbunden. Was für viele Unternehmen zwecks mangelnder Ressourcen eine Herausforderung darstellt (WILDEMANN 2005). Das bedeutet also eine steigende Bedeutung der Mitberücksichtigung von Varianten bei jedem Analyse- und Verbesserungsvorhaben.

Je nach Unternehmensstrategie zur Marktabdeckung stellt die Bedienung von einem möglichst großen Bereich eines bestimmten Marktes – beispielsweise bei der Gesamtabdeckung nach PORTER (2004) – ein potenzielles strategisches Ziel dar. Bei der Verfolgung dieses Zieles besitzt die Breite des Produktprogramms des Unternehmens und demzufolge die externe Varianz eine besondere Bedeutung. Diese Breite ist bei eventuellen Analysen oder Verbesserungsmaßnahmen als Kontante zu betrachten. Wovon auch bei dieser Arbeit ausgegangen wird. Folglich kann das im Kontext dieser Arbeit allgemeine Ziel für die Produktentwicklung und die Analyse bestehender Produktarchitekturen wie folgt formuliert werden (PONN & LINDEMANN 2011, KIPP 2012):

„Reduktion der internen Variantenvielfalt und Komplexität bei gleichbleibender externer Varianz“

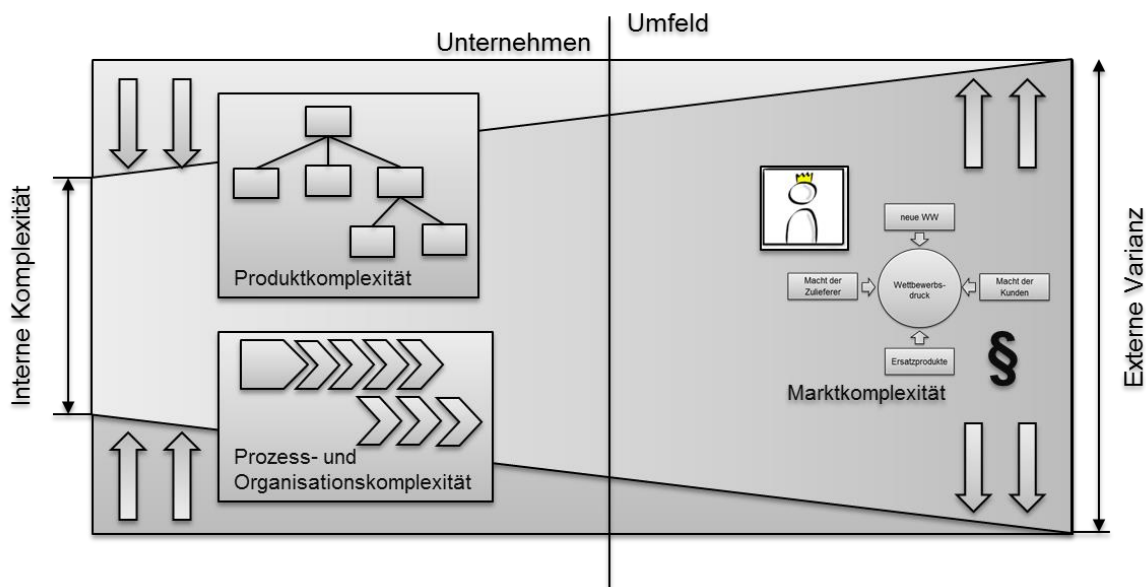


Abbildung 1-6: Schematische Darstellung der allgemeinen Zielsetzung zur Reduktion der internen Varianz und Komplexität (vgl. BLEES 2011, KIPP 2012)

Aber auch bei einer sogenannten Teilmarktabdeckung nach PORTER (2004) bietet die Realisierung der externen Variantenvielfalt mit einer möglichst geringen internen Variantenvielfalt, wie zum Beispiel die Teilevielfalt (WILDEMANN 2005), ein zutreffendes Ziel. Das, was sich im Verhältnis zur Strategie der Gesamtabdeckung ändert, ist die Breite der Betrachtung, Analyse und Anwendung der Maßnahmen zur Zielerreichung.

Ursachen für die steigende Variantenvielfalt

Wie PONN & LINDEMANN (2011) beschreiben, erfordern die Handhabung und Beherrschung variantenreicher technischer Produkte ein Verständnis der Ursachen und Folgen der Variantenvielfalt. Die steigende interne Variantenvielfalt resultiert sowohl aus externen Einflussfaktoren als auch aus internen Ursachen innerhalb eines Unternehmens. Die unternehmensexternen Ursachen ergeben sich aus den Bereichen, auf die das Unternehmen

wenig Einfluss hat. Der Markt, die Gesetzgebung und der Wettbewerb sind beispielsweise externe Bereiche, die die Produktvielfalt eines Unternehmens beeinflussen. Die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten und die dabei notwendige Differenzierung gegenüber dem Wettbewerb führen zu einer hohen externen Variantenvielfalt, die dem Markt angeboten und beherrscht werden muss (PONN & LINDEMANN 2011, PILLER & WARINGER 1999). Außerdem führt die steigende Individualisierung und Heterogenität der Kunden zu einer starken Fragmentierung der Märkte, wo im Extremfall ein Marktsegment nur noch von einem Kunden besetzt wird (WILDEMANN 2005). Darüber hinaus zwingt der erhöhte globale Wettbewerb die Unternehmen ebenfalls global tätig zu werden, um weitere Absatzmärkte zu erschließen. Die unterschiedliche Gesetzgebung und die daraus resultierenden Anforderungen und Normen an die Produkte rufen weitere Produktvarianten hervor. Im Allgemeinen sind die externen Ursachen und Quellen der Variantenvielfalt ähnlich oder gleich mit den Treibern der externen Komplexität (s. Kap. 1.1.1).

Wie auch im Kapitel 1.1.1 beschrieben wird, verursacht die externe Komplexität und Produktvielfalt eine erhöhte interne Komplexität. Teilaspekt dieser internen Komplexität ist die interne Variantenvielfalt auf der Bauteilebene. So steigt die Anzahl an Bauteilen und Baugruppen, die dafür benötigt werden, um die unterschiedlichen Produktvarianten herzustellen und folglich sinkt der Standardisierungsgrad (WILDEMANN 2005). Die erhöhte Teilezahl führt wiederum zu einer Erhöhung der Technologievielfalt und der Komplexität von Fertigungsprozessen.

Es gibt aber weitere Ursachen für die steigende interne Variantenvielfalt, die nicht exogenen Parametern zurückzuführen sind. Ein wichtiger Aspekt ist die Variantengenerierung im Arbeitsprozess und das fehlende Bewusstsein der Mitarbeiter, schon vorhandene Lösungen und Standards für ähnliche konstruktive Probleme zu benutzen (WILDEMANN 2005). Im Zusammenhang mit Zukäufen von Wettbewerbern und Übernahme weiterer Produkte führt das über die Jahre zu einem historisch gewachsenen und intransparenten Produktprogramm (PONN & LINDEMANN 2011). Darüber hinaus erwähnen PONN & LINDEMANN (2011) organisatorische Ursachen, die unnötig zu einer Erhöhung der Variantenvielfalt führen können. Als solche nennen PONN & LINDEMANN (2011) besonders die Zielkonflikte innerhalb eines Unternehmens zwischen einzelnen Fachbereichen.

Letztlich sollen auch kurz der Nutzen und die positiven Folgen der Variantenvielfalt diskutiert werden. Einerseits bietet die Produktvielfalt eine breitere Marktbedienung und Erschließung neuer Marktsegmente. Des Weiteren erzeugt ein breites und ständig auf neue Kundenwünsche und Trends aktualisiertes Produktprogramm Kaufanreize (PONN & LINDEMANN 2011) und steigert demzufolge die Bindung der Kunden an die Produkte des Unternehmens. Darüber hinaus sieht SCHUH (2005) in der Produktvielfalt einen positiven Nutzen als Markteintrittsbarriere für Wettbewerber.

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Grundlagen zur Komplexität, Variantenvielfalt, Produktarchitektur und die Zusammenhänge zwischen diesen Begriffen gegeben wurden, werden im nächsten Abschnitt ein paar Fallbeispiele zur Produktarchitektur aus der Praxis vorgestellt. Diese Fallbeispiele machen die Intransparenz und Komplexität deutlich, die oft eine Produktarchitektur einnehmen kann. Aus diesen Fallbeispielen wird die konkrete Problembeschreibung und Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

1.2 Problembeschreibung

Im Folgenden wird die Problembeschreibung bezüglich der Steigerung der Komplexität und Intransparenz für Produktarchitekturen anhand von zwei Fallbeispielen erläutert. Ziel dabei ist die Verschiedenheit der Situationen aufzuzeigen und folglich auch die Notwendigkeit von situationsgerechten Analysemethoden. Diese Beispiele und Anfangsuntersuchungen wurden im Rahmen von Forschungsprojekten zwischen dem Lehrstuhl für Produktentwicklung und den jeweiligen Unternehmen durchgeführt, die der Autor betreut und bearbeitet hat.

Pneumatische Ventile von Bremssteuerungssystemen

Einen erheblichen Kostentreiber bei Produktionsunternehmen stellt die Vielfalt der zu produzierenden Produkte dar (s. auch Kap.1.1.3). Eine Strategie des Variantenmanagements, um Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen anbieten zu können, ist die Standardisierung von Komponenten. Das Ziel dabei ist die Realisierung einer möglichst breiten Wiederverwendung dieser Komponenten innerhalb einer Produktfamilie (PONN & LINDEMANN 2011, WILDEMANN 2005).

Das Produktspektrum der Knorr Bremse Sfs GmbH zeichnet sich durch eine hohe externe Varianz² bei gleichzeitig geringen Stückzahlen aus. Die wichtigsten Ursachen dafür sind mehrere Unternehmenszukäufe in der Vergangenheit, ein historisch gewachsenes Produktspektrum, mehrere verteilte Entwicklungsstandorte, sowie fehlende Vorgaben in Form von Werksnormen (KIRNER et al. 2013). Dies führt zu einer hohen internen Komplexität und erhöhten Herstellungskosten.

Bei einer Betrachtung der Produktarchitektur von pneumatischen Ventilen vom Abstrakten zum Konkreten (s. Abbildung 1-7 und Abbildung 1-8) – ähnlich wie bei PONN & LINDEMANN (2011) – wird eindeutig, dass die Varianz mit der Konkretisierung zunimmt.

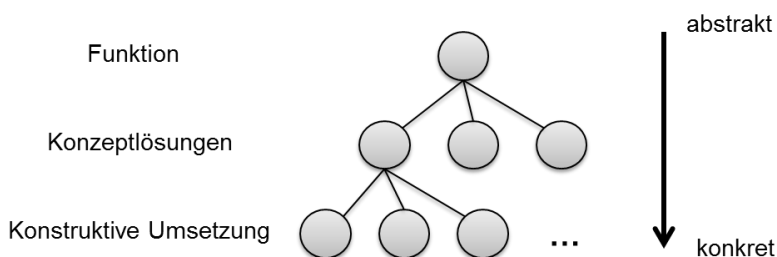


Abbildung 1-7: Konkretisierung einer Funktion über Konzeptlösungen bis hin zur konstruktiven Umsetzung

² Knorr Bremse Sfs GmbH ist ein Systemlieferant von Bremssteuerungssystemen für Schienenfahrzeuge. Diese Systeme bestehen aus verschiedenen Subsystemen und Komponenten. Ein Teil dieser Subsysteme sind pneumatische Ventile (bspw. Rückschlagventilen), die bei dieser Arbeit näher betrachtet werden.

Die pneumatischen Ventile sind vom Aufbau und Anzahl an Bauteilen relativ einfache technische Produkte, die eindeutige Funktionen realisieren, wie beispielsweise „Rückströmen verhindern“. Diese Funktionen können aber durch eine Vielzahl unterschiedlicher konstruktiver Ausführungen realisiert werden. Daraus entsteht eine hohe Variantenanzahl auf der Bauteil- und Produktebene (s. Abbildung 1-8). Außerdem erfordern unterschiedliche konstruktive Ausführungen den Einsatz unterschiedlicher Herstellungstechnologien. Auf diese Weise können beispielsweise Führungsflächen mit geeigneten Beschichtungen und präziser Oberflächenbearbeitung metallisch dichtend konstruiert werden, was ein tiefgreifendes Wissen über diese Technologie erfordert. Alternativ können Führungsflächen von Verschleißkörpern³ mit dem Einsatz von Dichtringen gedichtet werden. Auch der Einsatz solcher Dichtringe auf Kautschukbasis erfordert ein hohes Maß an Know-How bezüglich Gestaltung, Einsatztemperaturen und Verhalten der Dichtringe. Die Vielfalt auf der Konzept- und konstruktiven Ebene hat also eine Erhöhung der Vielfalt von verwendeten Technologien und Techniken und dementsprechend eine Zunahme der internen Komplexität zur Folge.

Die negativen Einflüsse der unnötig erhöhten Variantenvielfalt werden noch gravierender, wenn man die Anforderung an mehrjährige Gewährleistung berücksichtigt. Zudem wird der Einfluss exogener Parameter (s. Kap. 1.1.3) auf das Produktprogramm stärker. Ändern sich bestimmte Normen, so ist eine Vielzahl von technischen Lösungen und Produkten der aktuellen Gesetzgebung anzupassen.

Zusammenfassend sind Technologien, Herstellverfahren sowie Anforderungen wichtige Einflussparameter für die Produktarchitektur der pneumatischen Ventile. Weitere wichtige Aspekte sind die Varianz auf Konzept- und Bauteilebene. Eine Analyse und Verbesserung der Produktarchitektur sollte also diese Perspektiven beinhalten.

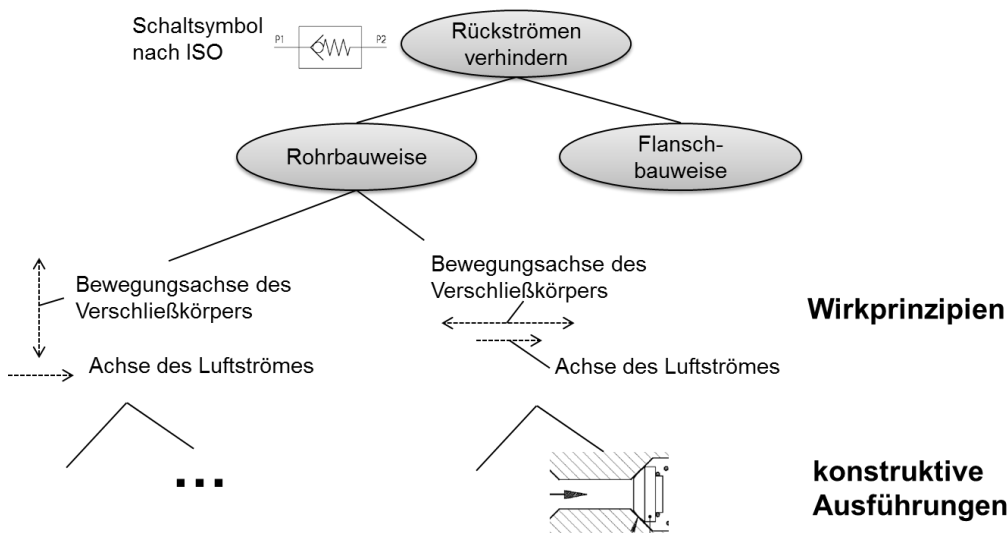


Abbildung 1-8: Betrachtung vom Abstrakten zum Konkreten. Unterschiedliche konstruktive Ausführungen der gleichen Funktion

³ Als Verschleißkörper wird das bewegte Bauteil eines Ventils bezeichnet, das mit seiner Bewegung den Ventilsitz des Ventils verschließt oder öffnet und demzufolge das Zuströmen verhindert oder erlaubt.

Produktarchitektur eines Nutzfahrzeugs

Im Gegensatz zu den pneumatischen Ventilen, die als Komponenten eines übergeordneten Systems zu betrachten sind, stellt ein Nutzfahrzeug ein komplexes System dar, das aus einer Vielzahl verschiedener Subsysteme besteht. Die Subsysteme interagieren untereinander auf unterschiedliche Weisen. Ein Beispiel für die Relationsart zwischen zwei Subsystemen sind geometrische, bauraumtechnische oder funktionale Abhängigkeiten. Des Weiteren müssen diese Subsysteme eine große Anzahl von internen und externen Anforderungen⁴ erfüllen, die sich ebenfalls gegenseitig beeinflussen. Aus dieser Anforderungsstruktur können indirekte Abhängigkeiten zwischen den Subsystemen abgeleitet werden (MAURER 2007, EBEN & LINDEMANN 2010). Wenn beispielsweise zwei Subsysteme für die Erfüllung der gleichen Anforderung relevant sind, existiert aus der Perspektive der Anforderungsdomäne⁵ zwischen den beiden eine indirekte Abhängigkeit.

In Abbildung 1-9 (links) werden die Subsysteme eines Nutzfahrzeugs mit ihren geometrischen und bauraumtechnischen Abhängigkeiten graphisch dargestellt. Auf dem Bild rechts wird die Struktur der externen Anforderungen anschaulich, die von den Subsystemen erfüllt werden müssen. Aus der Anforderungsstruktur kann eine zusätzliche Perspektive der Struktur der Subsysteme abgeleitet werden, die bei einer Analyse der Produktarchitektur berücksichtigt werden muss.

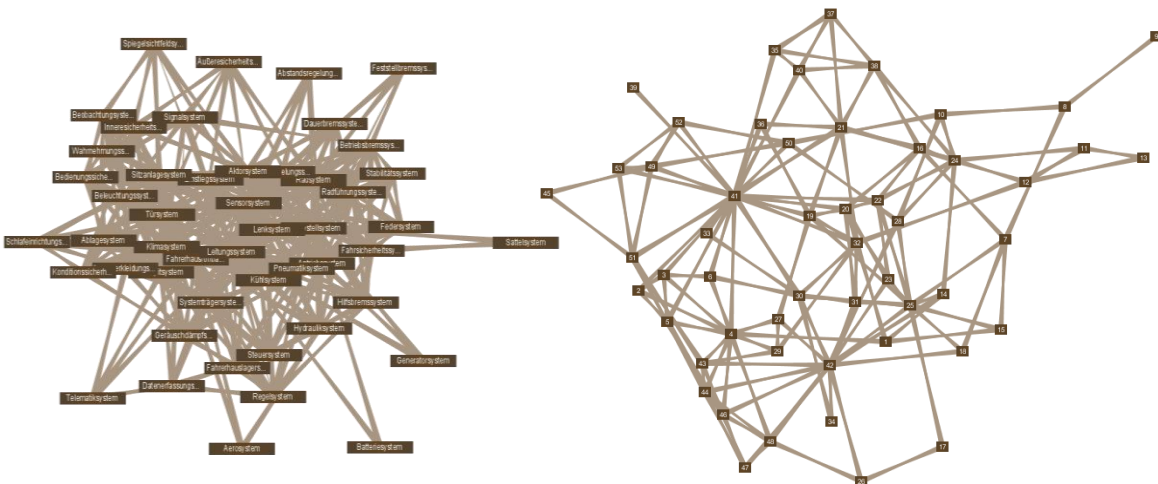


Abbildung 1-9: Gesamtstruktur eines Nutzfahrzeugs auf Systemebene (links) und Struktur der externen Anforderungen an das Nutzfahrzeug (rechts) (BIR 2011)

⁴ Ähnlich wie bei der Komplexität und Variantenvielfalt erfolgt hier die Kategorisierung der Anforderungen anhand exogener und endogener Quellen.

⁵ Der Begriff Domäne oder Betrachtungsdomäne beschreibt die Art der Elemente. Solche Domänen können bspw. Bauteile, Funktionen, Anforderungen, Prozesse, Lieferanten, etc. sein (MAURER 2007).

Die Systeme oder Subsysteme können weiter in Modulen oder Baugruppen bis hin zu einzelnen Bauteilen herunter gebrochen werden (PAHL et al. 2006). Abbildung 1-10 zeigt eine graphische Darstellung des Antriebsstrangs mit den geometrischen Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen. Im Graph sind ebenfalls mögliche Gruppierungen von Bauteilen farblich angedeutet, die für die Definition von Modulen und Baugruppen geeignet wären. Die Beurteilung dabei erfolgt nicht nur aus der geometrischen Perspektive, sondern auch unter Berücksichtigung der Anforderungsdomäne.

Ein weiterer wichtiger Aspekt solcher komplexer Produkte ist der Montageprozess (LOTTER & WIENDAHL 2006). Wegen der Existenz einer hohen externen Variantenvielfalt, der dabei verbundenen geringen Stückzahlen und der strukturellen Komplexität ist es notwendig die Produktarchitektur aus der Sicht des Montageprozesses⁶ zu analysieren (REINHART et al. 2000a). Die Fertigungstechnologien erweisen sich dabei als ein Einflussparameter niedriger Bedeutung, da meist die einzelnen Komponenten Zukaufteile sind. Auf der anderen Seite wird bei solchen Situationen die Lieferantenstruktur relevant (BEHNCKE et al. 2011). Anders also als bei den Ventilen besitzt hier der Montageprozess, die Lieferanten und die Detaillierung von Anforderungen vom groben Subsystem bis zur detaillierten Baugruppe eine bedeutende Rolle. Die Festlegung von einer effizienten modularen Produktarchitektur und derer Integration in einem Baukastensystem würde wesentliche Vorteile für den Montageprozess und die Flexibilität des Unternehmens mit sich bringen.

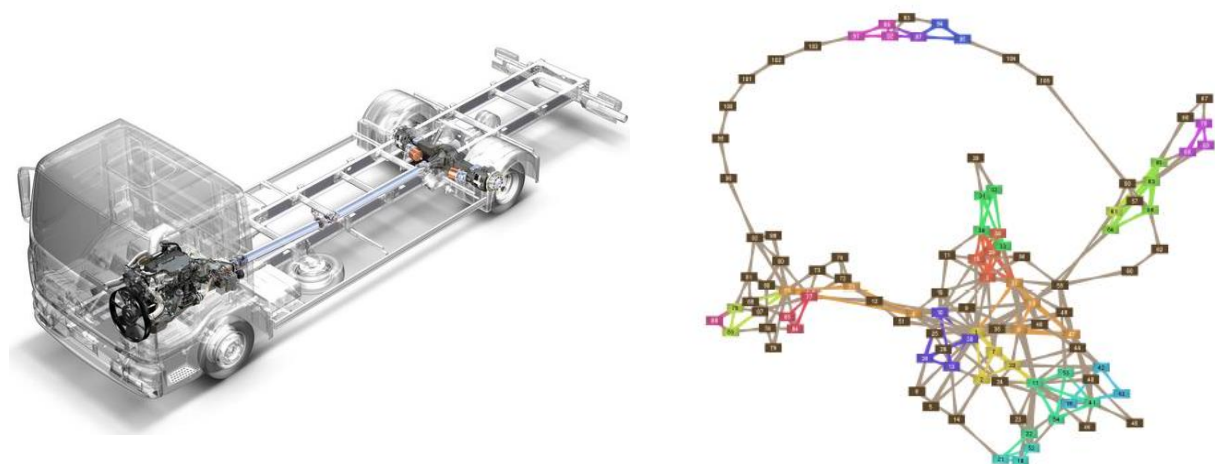


Abbildung 1-10: Physische Struktur des Antriebsstrangs (BIR 2011)

Ausgangssituation der Arbeit

Aus den beiden Beispielen für unterschiedliche Produktarchitekturen wird ersichtlich, dass das Analysevorhaben, die dabei verfolgten Ziele und die eingesetzten technischen Maßnahmen von

⁶ Ähnlich über indirekte Abhängigkeiten wie bei den Anforderungen

der jeweiligen Situation⁷, die Art des Produktes⁸ und den Detaillierungsgrad der Betrachtung abhängen. Auf diese Weise sollte die Produktarchitektur des Antriebsstrangs nicht nur aus der physischen⁹, sondern auch aus der Perspektive des Montageprozesses erfasst und analysiert werden. Bei den pneumatischen Ventilen dagegen, wäre die Zerlegung der Bauteile bis hin zu Konstruktionselementen¹⁰ und die Berücksichtigung von Bauteileigenschaften¹¹ unbedingt notwendig, um auf der Bauteilebene Standards definieren zu können. Je nach Produktarchitektur und Ausgangssituation sind also unterschiedliche Ziele zu verfolgen. Diese Ziele bestimmen dann im Zusammenhang mit der Ausgangssituation die technischen Maßnahmen, die für den spezifischen Fall geeignet sind.

Weiterhin existiert eine Vielzahl von technischen Maßnahmen, um eine Produktarchitektur zu verbessern. Die Modularisierung, die Definition von physischen Plattformen, die Aufstellung von modularen Baukastensystemen und Baureihen sowie die Verwendung des Standardisierungsprinzips¹² stellen beispielsweise wichtige Maßnahmen dar (PONN & LINDEMANN 2011, PAHL et al. 2006, SCHUH & SCHWENK 2001, PILLER & WARINGER 1999, RENNER 2007, BLEES C. et al. 2010, KISSEL 2014). Diese Maßnahmen können auf unterschiedlichen Abstraktions- und Detaillierungsebenen durchgeführt werden und je nach Ausgangssituation und Zielsetzung unterschiedliche Perspektiven berücksichtigen. Die Breite des abzudeckenden Spektrums spielt hier ebenfalls eine wesentliche Rolle.

Zusammenfassend sind folgende Punkte vor der Analyse einer Produktarchitektur zu klären:

- Welche Betrachtungsdomänen sind relevant
- Aus welcher Perspektive/-n soll analysiert werden

⁷ Hierbei fasst der Begriff Situation folgende Punkte zusammen:

1. Existenz von strukturierten Informationen über die Produktarchitektur und relevante Betrachtungsdomänen
2. Fertigungsart (Einzel-, Kleinserien-, Serienfertigung, etc.)
3. Fertigungstiefe

⁸ Der Begriff Produktart fasst folgende Punkte zusammen:

1. Physische und funktionale Komplexität (s. Kategorisierung von EHRENSPIEL et al. 2007b, S. 37)
2. Variantenvielfalt
3. Technologische Komplexität

⁹ d.h. aus der Perspektive der geometrischen und/oder bauraumtechnischen Anhängigkeiten

¹⁰ Im Rahmen dieser Arbeit werden als Konstruktionselemente konstruktive Besonderheiten eines Bauteils, wie z.B. Fasen, Aussparungen, Rillen oder Versteifungen, die eine eindeutige technische Funktion erfüllen bezeichnet. Konstruktionselemente können aufgrund der zu erfüllenden Funktion des Bauteils notwendig sein oder auch um eine leichtere Montage mit anderen Bauteilen zu ermöglichen und stellen dementsprechend oft die Schnittstelle zu anderen Bauteilen dar.

¹¹ Oberflächenbeschaffenheit, geometrische Abmessungen, Material, Kosten

¹² Beispielsweise Standards auf der Bauteilebene (Gleich- und Wiederholteile). Standardlösungen können aber nicht nur auf der physischen Ebene sondern auch auf der funktionalen Ebene festgelegt werden.

- Was sind die Schwerpunkte der Analyse
- Was soll durch die Analyse erreicht werden
- Wie kann Verbesserungspotential im IST-Zustand einer Produktarchitektur identifiziert werden
- Welche technischen Maßnahmen sind geeignet, um die Zielsetzung der Analyse zu erreichen
- Welche Methoden sind geeignet, um die technischen Maßnahmen durchzuführen

Folglich bedeutet eine ungenaue Planung und mangelnde Berücksichtigung der Ausgangssituation eine große Anzahl von Iterationen während des Analysevorgehens.

1.3 Ziele der Arbeit

Die Definition einer auf die jeweilige Situation geeigneten Produktarchitektur stellt eine wesentliche Phase im Produktlebenszyklus dar. Während dieser Phase werden ca. 70% der Kosten definiert, die später – hauptsächlich während der Fertigung, Montage und Materialwirtschaft – anfallen (EHRENSPIEL 2009). Die Entwicklungsaufgabe kann dabei je nach dem Neuigkeitsgrad in Neuentwicklung, Anpassentwicklung und Variantenentwicklung differenziert werden. Dabei ist wichtig anzumerken, dass ungefähr 70% bis 90% aller Produktentwicklungen Anpass- und/oder Variantenkonstruktionen entsprechen (ULLMAN 1992).

Aus den in Kapitel 1.2 vorgestellten Beispielen für Produktarchitekturen wird ersichtlich, dass die Analyse auf die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden muss. Dabei spielen sowohl die Ausgangssituation, das Produkt als auch das Analyseziel eine wichtige Rolle. Ziel dieser Arbeit ist einen strukturierten und methodischen Leitfaden für die Planung von Analysevorhaben und für die Auswahl geeigneter Maßnahmen und Methoden bereitzustellen. Ferner wird im Kontext der vorliegenden Arbeit eine generische Vorgehensweise vorgestellt, die die genaue Definition des Analysevorhabens unterstützt. Hierbei werden schrittweise folgende Einflussfaktoren behandelt: die Ausgangssituation, die Zielsetzung der Analyse, der Betrachtungsgegenstand, die relevanten Analyseperspektiven und –ebenen, die technischen Maßnahmen und Methoden zur Durchführung dieser Maßnahmen.

In anderen Worten Ziel dieser Arbeit ist dem Produkt- oder Systemarchitekten eines Unternehmens einerseits bei der Auswahl geeigneter Analysemethoden zu unterstützen, um im aktuellen Stand der Produktarchitektur Verbesserungspotential zu erkennen. Andererseits den Produktarchitekten einen Leitfaden für die Auswahl von geeigneten Maßnahmen zu bieten.

Zusammengefasst besteht die Zielstruktur dieser Arbeit aus folgenden Themen:

- Systematische Analyse der Ausgangssituation und Ableitung einer geeigneten Zielstruktur für die Analyse der Produktarchitektur
- Unterstützung der zielorientierten Auswahl geeigneter Methoden zur Modellierung von Produktarchitekturen
- Analyse des aktuellen Standes der Produktarchitektur. Beurteilung der aktuellen Produktarchitektur anhand geeigneter Kennzahlen. Aufzeigen von Schwachstellen und Stellen mit Verbesserungspotential

- Nachweisen der Verbesserungsrichtung und Erstellung von Handlungsanweisungen / -empfehlungen zur Erreichung eines verbesserten Soll-Zustandes für die Produktarchitektur

Die Produktarchitektur stellt dabei die Zieldomäne der jeweiligen Analyse dar. Zudem kann eine Produktarchitektur, wie bereits beschrieben, aus verschiedenen Perspektiven untersucht werden. Abbildung 1-11 zeigt ein paar wichtige Betrachtungsdomänen der Produktarchitektur, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Produktarchitektur besitzen und bei dieser Arbeit behandelt werden.

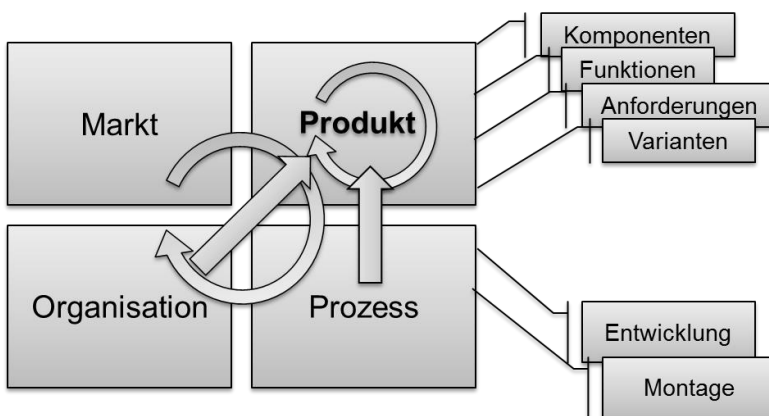


Abbildung 1-11: Inhaltliche Abgrenzung der Zieldomäne dieser Arbeit

1.3.1 Forschungsfrage und Schwerpunkt der Arbeit

Aus der dargelegten Zielsetzung lässt sich die allgemeine Forschungsfrage für diese Arbeit wie folgt formulieren:

Wie kann die Analyse einer Produktarchitektur je nach Ausgangssituation und Zielsetzung systematisch und methodisch unterstützt werden, um Schwachstellen und Verbesserungspotential im aktuellen Stand der Produktarchitektur zu identifizieren?

Diese Forschungsfrage lässt sich in untergeordneten detaillierten Forschungsfragen aufteilen und strukturieren, die den Punkten der Zielstruktur entsprechen.

1. *Wie beeinflusst die Ausgangssituation die Zielsetzung eines Analysevorhabens und wie kann die Zielsetzung des Vorhabens eindeutig definiert werden?*
2. *Welche sind geeignete Methoden, um den aktuellen Zustand einer Produktarchitektur zielorientiert und transparent zu modellieren?*
3. *Wie kann der aktuelle Zustand einer Produktarchitektur analysiert und beurteilt werden, um Schwachstellen und Verbesserungspotenzial zu erkennen?*

Abbildung 1-12 zeigt den Aufbau der Forschungsfragen und der dazugehörigen Hypothesen dieser Arbeit.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Untersuchung und Beantwortung der zweiten und dritten Forschungsfrage. Somit legt die Hypothese der ersten Forschungsfrage eher eine These oder Forschungsannahme als eine Hypothese im engeren Sinne dar.

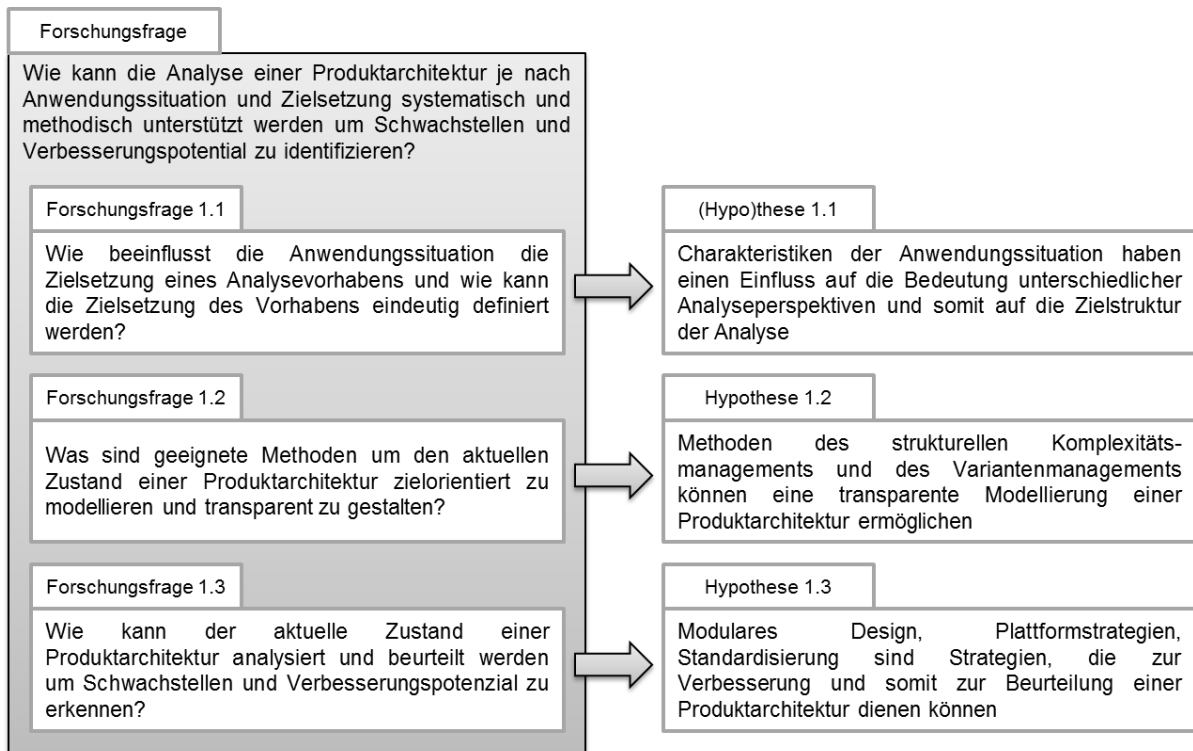


Abbildung 1-12: Forschungsfragen und entsprechende Hypothesen dieser Arbeit

1.4 Thematische Einordnung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist Entwicklung eines Leitfadens und einer methodischen Vorgehensweise zur Planung von Analysevorhaben von Produktarchitekturen, um Verbesserungspotential im aktuellen Zustand zu identifizieren und Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten. Um das zu erreichen und dem Produktarchitekten eine möglichst umfassende Unterstützung zu bieten, wird eine Auswahl von Modellierungs- und Analysemethoden sowie Kennzahlen zur Verfügung gestellt. Diese werden mit situationsspezifischen Merkmalen verknüpft, damit eine situationsgerechte Auswahl ermöglicht werden kann. Der Schwerpunkt und Beitrag dieser Arbeit liegt auf den Methoden zur Modellierung und Analyse von Produktarchitekturen und nicht auf der Vollständigkeit der situationsspezifischen Merkmale, die die Ausgangssituation beschreiben (s. Abbildung 1-13). Dennoch wird im Rahmen dieser Arbeit eine Anzahl von Merkmalen vorgestellt, um unterschiedliche Situationen möglichst eindeutig zu beschreiben und diese im Anschluss mit adäquaten Methoden zur Analyse und Potentialerkennung zu verknüpfen.

Dafür werden in dieser Arbeit vorhandene Methoden aus verschiedenen Forschungsfeldern situationsgerecht angepasst, kombiniert und weiterentwickelt. Abbildung 1-13 zeigt eine

Auflistung der relevanten Forschungs- und Behandlungsfelder mit besonderer Andeutung des Schwerpunktes der Arbeit.

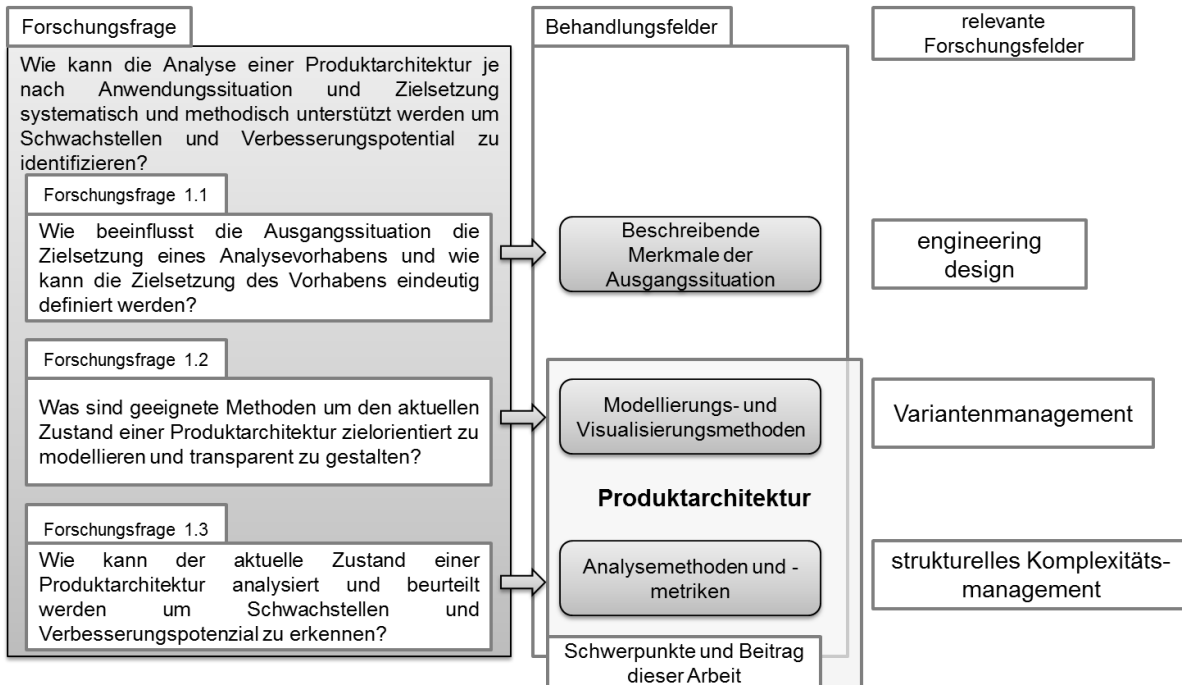


Abbildung 1-13: Schematische Aufstellung des Beitrags dieser Arbeit und relevanter Forschungsfelder

Durch *engineering design* und Variantenmanagement können Einflussfaktoren auf die Entwicklung von Produktarchitekturen identifiziert werden. Die Fertigungsart spielt beispielsweise eine bedeutende Rolle bei der Gestaltung von Produkten und stellt demzufolge ein beschreibendes Merkmal der Ausgangssituation dar. Zudem bieten *engineering design* und das strukturelle Komplexitätsmanagement eine große Anzahl von Methoden zur Modellierung von Produkten. Methoden des Variantenmanagements ergänzen schließlich die Auswahlmöglichkeiten von Methoden zur Modellierung von Produktfamilien und Produktvarianten. Wichtig anzumerken ist, dass der Hauptteil dieser Methoden auch zur Analyse der erfassten Strukturen angewendet werden kann. Letztlich bieten diese Forschungsfelder auch eine große Anzahl von Kennzahlen¹³, um wichtige Merkmale einer Struktur zu identifizieren und zu beurteilen.

Weitere wichtige Forschungsfelder und Disziplinen für Kennzahlen und Analysemethoden stellen *software engineering* und *management science* dar (KREIMEYER 2009), die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden.

¹³ Die Begriffe Kennzahl und Metrik werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

1.5 Forschungsmethodik

Die Anwendung einer systematischen Forschungsmethodik stellt eine Voraussetzung für die Durchführung einer wissenschaftlichen Arbeit dar. BLESSING & CHAKRABARTI (2009) definieren ein Standardvorgehen für Forschungsarbeiten, das in Abbildung 1-14 veranschaulicht ist.

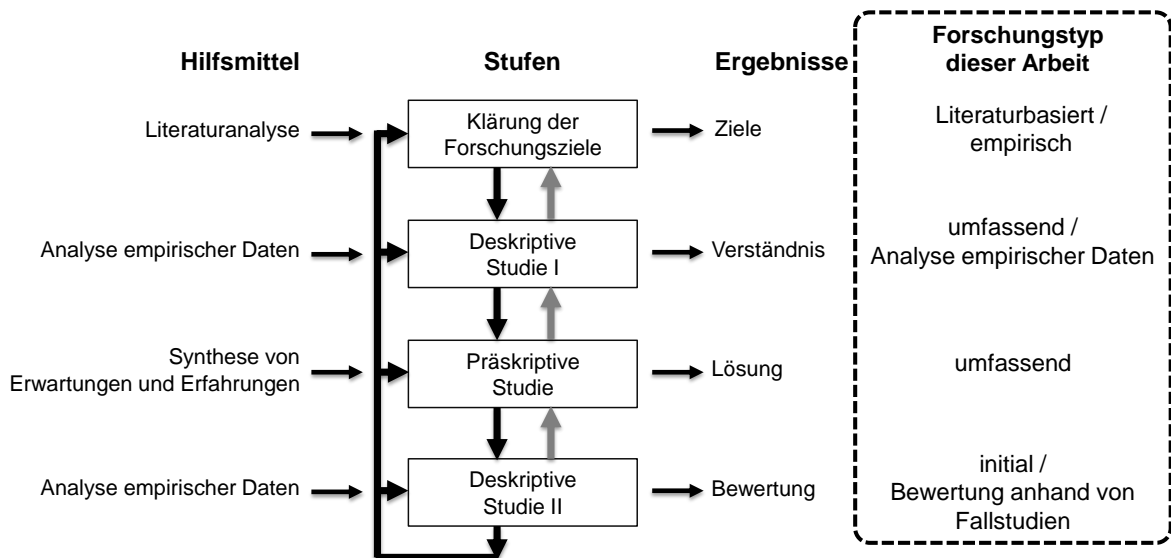


Abbildung 1-14: Festlegung des Forschungstyps dieser Arbeit anhand des Standardvorgehens von Design Research Methodology (BLESSING & CHAKRABARTI 2009)

Ziel des ersten Schrittes ist, realistische Ziele der eigenen Arbeit zu definieren. Eine detaillierte Literaturanalyse ist in dieser Phase bei allen Forschungstypen notwendig. Zusätzlich liefern empirische, deskriptive Studien wichtige Erkenntnisse über die zu definierenden Ziele und die Ausgangssituation. Im nächsten Schritt soll durch die Analyse empirischer Daten ein tiefgreifendes Verständnis über relevante Forschungsfelder und die eigentliche Problemstellung geschaffen werden. Es handelt sich praktisch um eine Verfeinerung und Detaillierung der im vorherigen Schritt definierten Forschungsziele. Während der Synthese ist durch eine präskriptive Studie eine Lösung für die Problembeschreibung und die definierten Ziele zu entwickeln. Letztlich ist im letzten Schritt eine Bewertung der aufgestellten Lösung durchzuführen. Wichtige Voraussetzung dafür ist die Definition von sogenannten Erfolgskriterien für die Durchführung der Bewertung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bewertung auf Basis von drei Fallstudien durchgeführt. Dabei beschreiben diese Fallstudien drei unterschiedliche Szenarien und Situationen aus der industriellen Praxis. Auf diese Weise kann die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise und Methodik hinsichtlich der Anwendbarkeit und Brauchbarkeit in verschiedenen Situationen überprüft und kritisch diskutiert werden.

1.6 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit wird in insgesamt sechs Kapiteln geteilt und strukturiert (s. Abbildung 1-15). Im ersten Kapitel wird eine umfassende Einleitung zum Thema Produktarchitekturen, Komplexität und Variantenvielfalt gegeben. Durch zwei Beispiele wird der Handlungsbedarf für ein systematisches, situationsgerechtes und zielorientiertes Analyseverfahren für Produktarchitekturen gezeigt. Folglich werden die Ausgangssituation sowie die Ziele der vorliegenden Arbeit beschrieben und thematisch eingeordnet.

Im zweiten und dritten Kapitel werden wichtige theoretische Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit beschrieben und der Stand der Forschung relevanter Analysemethoden gegeben. Kapitel zwei befasst sich mit den notwendigen theoretischen Grundlagen sowie mit der Definition und Beschreibung wichtiger Begriffe. Darüber hinaus werden im Kapitel zwei unterschiedliche Arten von Produktarchitekturen und deren Zusammenhänge beschrieben. Im nachfolgenden Kapitel drei werden zuerst drei relevante Ansätze für eine systematische Analyse dargestellt, die auch für die Analyse von Produktarchitekturen herangezogen werden können. Dabei wird auch kurz beschrieben, welche Punkte dieser Ansätze für die Aufstellung des Analyseverfahrens im Kapitel vier übernommen wurden. Im nächsten Abschnitt, werden zehn Kernmethoden zur Analyse von Produktarchitekturen präsentiert und erläutert.

Im vierten Kapitel der Arbeit werden das Analyseverfahren und nachfolgend die Methodik beschrieben. Dabei werden die Schritte der vorgestellten Vorgehensweise von der Situationsanalyse und Zielklärung über die Methodenauswahl bis zur Erkennung vom Verbesserungspotenzial erläutert.

Im fünften Kapitel werden dann drei Fallstudien präsentiert und näher erläutert, damit das Vorgehen und seine Effektivität veranschaulicht werden. Diese Fallstudien entsprechen drei unterschiedlichen Ausgangssituationen für die Analyse einer Produktarchitektur. Indessen wird es anschaulich, dass je nach konkretem Fall unterschiedliche Sichten und Betrachtungsdomänen auf die Produktarchitektur notwendig sind, um eine holistische Analyse durchzuführen und gegebenenfalls Verbesserungspotenzial zu erkennen.

Im letzten Abschnitt des fünften Kapitels finden eine Diskussion der Ergebnisse der Fallstudien sowie eine Reflexion der Vorgehensweise statt. Ferner wird das vorgestellte Vorgehen und Methodik anhand der gesetzten Ziele evaluiert. Auf Basis dieser Evaluation wird das Potenzial an weiteren Forschungsaktivitäten identifiziert und weiterhin werden Forschungsziele für nachfolgende Arbeiten gegeben. Letztlich wird die Arbeit mit einer kurzen Zusammenfassung der wichtigsten Themen abgerundet.

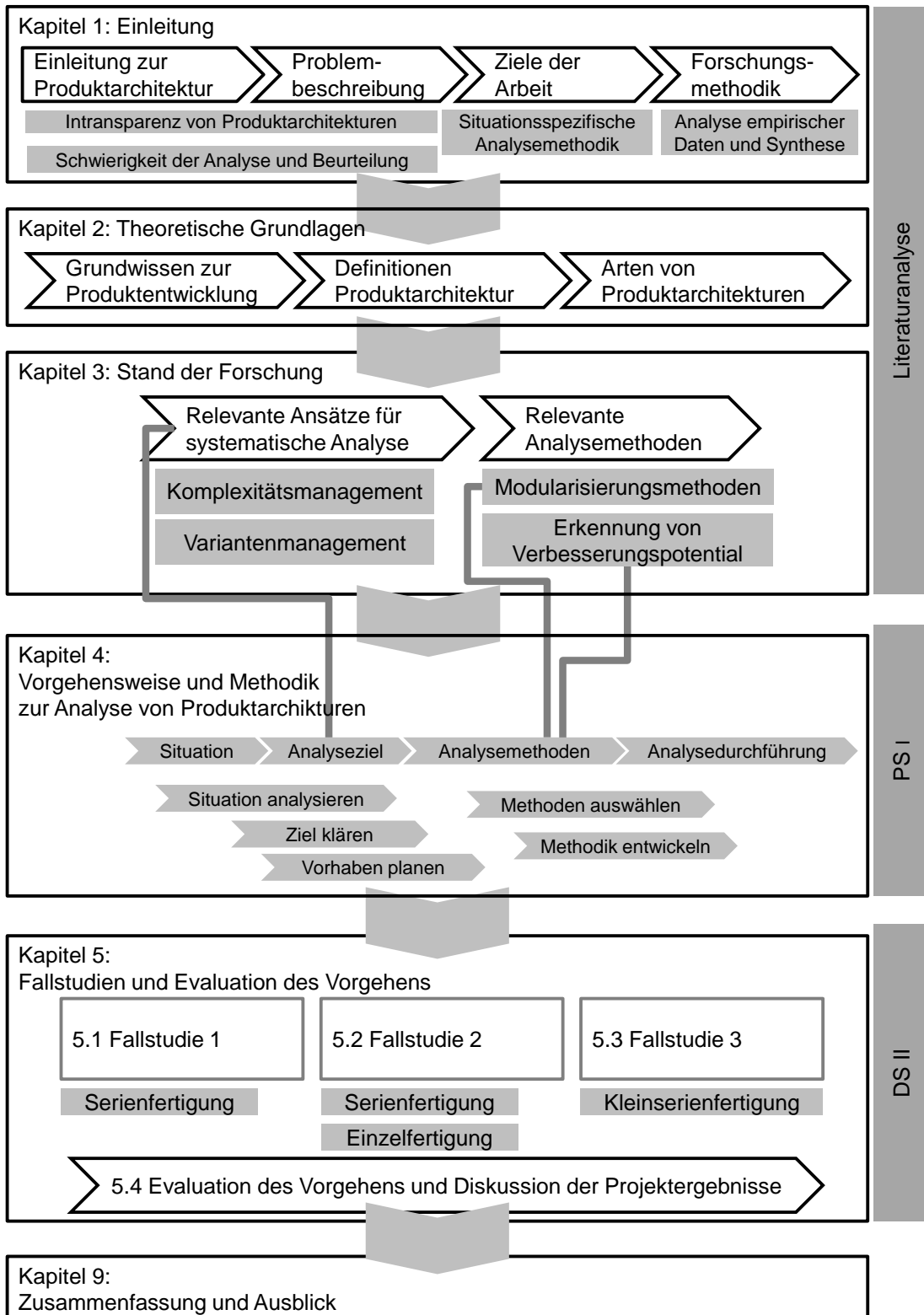


Abbildung 1-15: Kapitelstruktur und Aufbau der Inhalte der vorliegenden Arbeit

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen wichtige für das Verständnis dieser Arbeit theoretische Grundlagen gegeben werden. Einerseits werden hier Modelle zur Beschreibung von Produkten und Vorgehensweisen in der Produktentwicklung vorgestellt und erläutert. Andererseits wird auf die unterschiedlichen Arten von Produktarchitekturen näher eingegangen. Die Beschreibungsmodelle dienen dabei mit ihren unterschiedlichen Betrachtungsdimensionen und Ebenen nicht nur auf die genaue Beschreibung eines einzelnen Produktes, sondern können auch für eine detaillierte Beschreibung einer Produktarchitektur herangezogen werden. Letztlich soll auch eine Übersicht über mögliche Eingriffsmöglichkeiten und Maßnahmen zur Verbesserung einer Produktarchitektur gegeben werden. Ein wichtiger Aspekt dieser Maßnahmen sind die Dimensionen und Ebenen eines Produktes und demzufolge auch der Produktarchitektur, auf denen sie umgesetzt werden können.

2.1 Beschreibungsmodelle und Vorgehensweisen in der Produktentwicklung

Vorgehensmodelle beschreiben wichtige Elemente einer Handlungsabfolge bei bestimmten Situationen oder Zielsetzungen. Sie können als Hilfsmittel zur Planung, Navigation und der Reflexion von Prozessen dienen. Die Mehrheit der Vorgehensmodelle bildet den Problemlösungsprozess als lineare Darstellung ab. LINDEMANN (2009) umgeht die häufig auf ein Grundmuster fixierte Darstellung durch ein Modell aus sieben sich überschneidenden Kreisen, welche untereinander einen hohen Vernetzungsgrad aufweisen (siehe auch Abbildung 2-1).

Das Münchener Vorgehensmodell von LINDEMANN (2009) ist ein netzwerkartiges Modell, das den Prozess der Problemlösung in der Produktentwicklung darstellt. Es basiert auf bekannten Vorgehensmodellen und Erkenntnissen aus verschiedenen Forschungsprojekten und Erfahrungen aus der industriellen Anwendung.

Die grundlegende Bearbeitungsabfolge der Schritte im Modell orientiert sich an den drei Hauptschritten zur Problemlösung (LINDEMANN 2009 S.45, EHRENSPIEL 2009 S.76ff.):

- Ziel beziehungsweise Problem klären,
- Lösungsalternativen generieren und
- Entscheidung herbeiführen.

Unter Kenntnis dieses Zusammenhangs wird ein **Standardvorgehen** definiert, das der linearen Abfolge der meisten Vorgehensmodelle im Rahmen der Entwicklungsmethodik entspricht (siehe Abbildung 2-1).

Die vernetzte Gestalt des Münchener Vorgehensmodells betont den flexiblen Charakter des Modells. Es wird hiermit hervorgehoben, dass die Navigation im Modell nicht immer linear abläuft, sondern auch sprunghaft, iterativ und/oder rekursiv erfolgen kann.

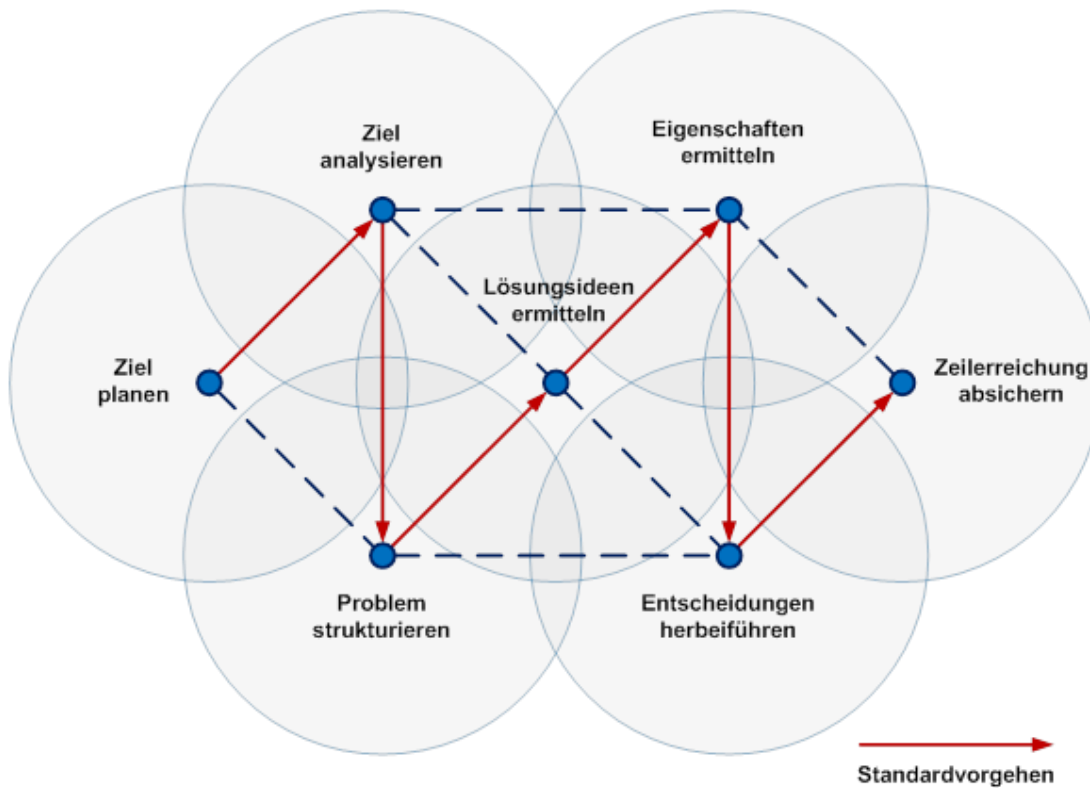


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Münchener Vorgehensmodells (MVM) (LINDEMANN 2009)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit spielen Vorgehensmodelle zur Problemlösung eine wichtige Rolle. Durch Abstraktion des Vorgehensmodells können die gleichen logischen Schritte zur Klärung und Bewältigung eines Analyse- und Synthesevorhabens herangezogen werden (siehe Kap. 4). Der Betrachtungsgegenstand kann dabei nicht nur ein Produkt beziehungsweise die Entwicklung eines Produktes sein, sondern auch eine Produktarchitektur und die Aufgabe die gezielte und situationsbedingte Analyse dieser Produktarchitektur.

Dabei existieren Vorgehensmodelle mit einem unterschiedlichen Auflösungsgrad, wie auch Abbildung 2-2 zeigt. Der Auflösungsgrad einer Betrachtung reicht von der Betrachtung elementarer Prozesse und Denkabläufe (Mikrologik) bis hin zur abstrakten Betrachtung größerer Arbeitsabschnitte und Phasen oder sogar eines komplexen Gesamtprojektes (Makrologik). Dementsprechend werden beispielsweise Vorgehensmodelle mit einem niedrigen Auflösungsgrad verwendet, wenn es darum geht, eine Übersicht über ein Projekt zu verschaffen (LINDEMANN 2009). Relevant für diese Arbeit und für die vorgestellte Vorgehensweise zur Analyse von Produktarchitekturen sind dagegen Vorgehensmodelle, die einen höheren Auflösungsgrad besitzen, so dass einzelne Arbeitsschritte abgebildet werden. Diese Ebene ist die Ebene der operativen Arbeitsschritte, zu der auch das Münchener Vorgehensmodell gehört.

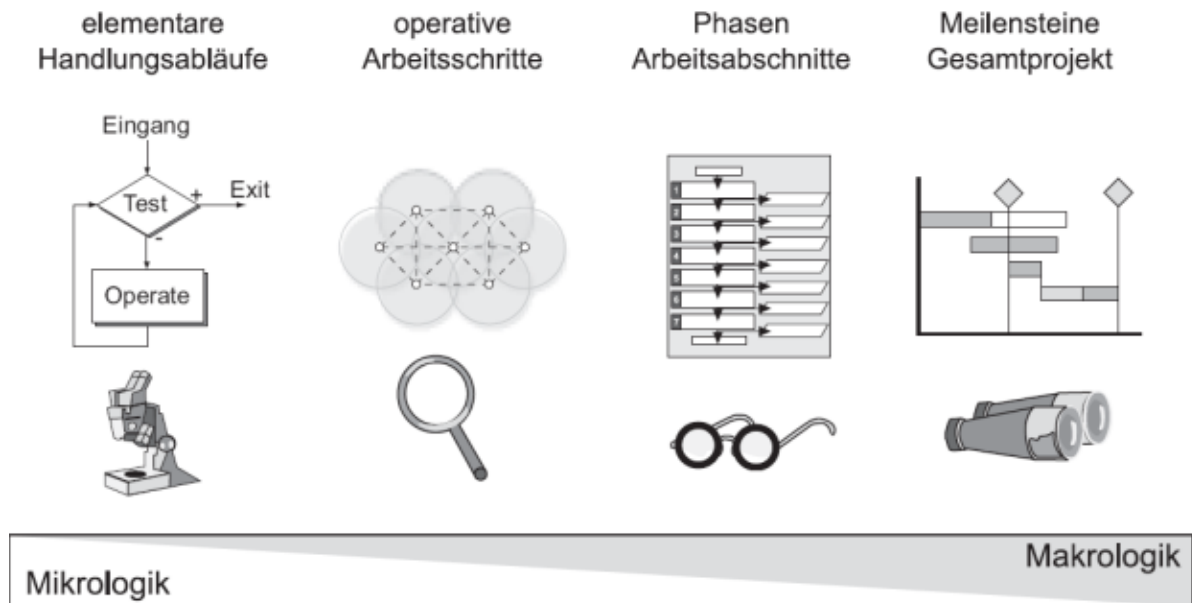


Abbildung 2-2: Unterschiedlichen Auflösungsgrade von Vorgehensmodellen zur Problemlösung (LINDEMANN 2009, S.38)

Nach der Vorstellung einiger Vorgehensweisen in der Produktentwicklung und deren Bedeutung werden im nächsten Kapitel Modelle für die Beschreibung von Produkten und technischen Systemen vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Dimensionen und Ebenen der Produktbeschreibung für die Definition und Eingrenzung einer Produktarchitektur verwendet. Außerdem dienen die verschiedenen Ebenen dazu, die Maßnahmen für die Analyse und Optimierung einer Produktarchitektur genau zu beschreiben und zu kategorisieren.

Dimensionen der Produktbeschreibung

Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellen zur Beschreibung von Produkten und technischen Systemen. Nichtsdestotrotz verwenden diese Modelle ähnliche Dimensionen für die Definition der verschiedenen Beschreibungsebenen. Die Dimension **vom Abstrakten zum Konkreten** gibt den Konkretisierungsgrad der Beschreibung des Produktes beziehungsweise der entstehenden Ergebnisse des Produktentwicklungsprozesses (PONN & LINDEMANN 2011). Ein Modell, das die unterschiedlichen Ebenen der Produktkonkretisierung und der Dimension vom Abstrakten zum Konkreten behandelt, ist das Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung von EHRENSPIEL (2009) (siehe Abbildung 2-3). In diesem Modell werden vier verschiedene Bereiche definiert. Ausgehend von den Produkthanforderungen und der abstrakten funktionalen Ebene, die die Lösungsmöglichkeiten darstellt, werden auf der nächsten Ebene die prinzipiellen physikalischen Lösungsmöglichkeiten definiert und somit werden die Lösungsmöglichkeiten im Verhältnis zur funktionalen Ebene konkretisiert. Die weitere Konkretisierung der Lösungsmöglichkeiten führt zur Beschreibungsebene der Gestalt, wo die unterschiedlichen Lösungen eine noch relativ abstrakte Gestalt annehmen. Im nächsten

Schritt der Konkretisierung entstehen die genauen und konkreten fertigungs- und montagetechnischen Lösungsmöglichkeiten.

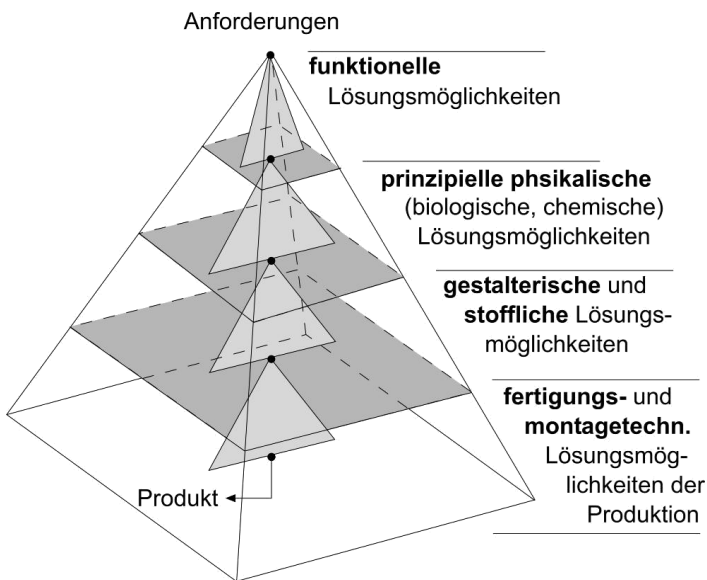


Abbildung 2-3: Das Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung (EHRENSPIEL 2009)

Die Dimension vom Abstrakten zum Konkreten stellt nicht die einzige relevante Dimension zur Produktbeschreibung und zur vollständigen Definition einer Produktarchitektur dar. Eine weitere Dimension ist die Dimension **vom Groben ins Detail**, die den Zerlegungsbeziehungsweise den Detaillierungsgrad der Betrachtung eines Produktes angibt. Die zugehörigen Richtungen dieser Dimension sind das Zerlegen und Detaillieren eines Produktes beziehungsweise einer Architektur in deren Bestandteile und das Zusammenfügen und Kombinieren der einzelnen Bausteine oder Elemente in Gruppen, Modulen bis hin zum ganzen System (PONN & LINDEMANN 2011). Wichtig anzumerken ist, dass diese Dimension in Verbindung mit dem Konkretisierungsgrad für eine eindeutige Produktbeschreibung verwendet werden kann. Dementsprechend existiert die Dimension vom Groben ins Detail nicht nur auf den konkreten gestalterischen und fertigungstechnischen Ebenen, sondern kann auch auf der abstrakten funktionalen Ebene der Produktkonkretisierung Anwendung finden. Somit können verschiedene elementare Funktionen in Funktionsgruppen und –module zusammengefügt werden. Ferner können Funktionsgruppen in übergeordneten technischen Funktionen kombiniert werden, die die geforderten Kundenfunktionen realisieren.

Eine weitere relevante Dimension, die von PONN & LINDEMANN (2011) beschrieben wird, ist der **Variationsgrad** und das Denken in Alternativen. Dabei ist das Variieren der unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten auf den verschiedenen Ebenen der Produktkonkretisierung von Bedeutung.

Diese drei Dimensionen werden einheitlich im Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) abgebildet. Dabei dient der Produktentstehungsprozess als Navigation durch den Raum, der von diesem Modell definiert wird. Anders als beim Pyramidenmodell wird der Anforderungsraum beim Münchener Produktkonkretisierungsmodell durchgängig über alle

Ebenen der Produktkonkretisierung gespannt. So werden Anforderungen ebenfalls konkretisiert und detailliert, wie die Lösungsmöglichkeiten (siehe Abbildung 2-4).

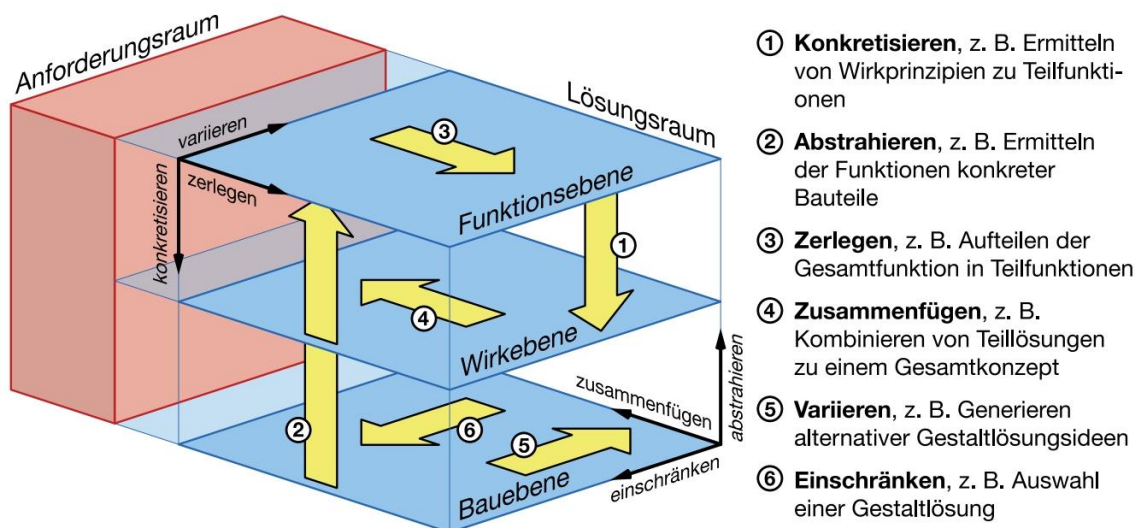


Abbildung 2-4: Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) und Darstellung einiger Konstruktionstätigkeiten (PONN & LINDEMANN 2011)

Wie von der Abbildung 2-4 ersichtlich wird, werden auf der Dimension der Produktkonkretisierung drei folgende Ebenen definiert:

- Funktionsebene
- Wirkebene
- Bauebene

Dabei entspricht die Funktionsebene der Ebene der funktionalen Lösungsmöglichkeiten im Pyramidenmodell. Ähnlich entspricht die Wirkebene der Ebene der physikalischen Lösungsmöglichkeiten, wo verschiedene Wirkprinzipien zur Realisierung der Funktionen konkretisiert werden. Die gestalterische Ebene im Pyramidenmodell ist zwischen der Wirk- und Bauebene des MKM zu positionieren und schließlich werden auf der Bauebene die konkreten fertigungs- und bautechnischen Lösungen eines Produktes oder Systems beschrieben.

Ähnlich wird ebenfalls die Dimension vom Groben ins Detail in vier hierarchisch gegliederten Ebenen skaliert (siehe auch Abbildung 2-5). Diese Ebenen sind folgende:

- Produkt- oder Produktfamilienebene
- Baugruppenebene
- Teileebene
- Technologieebene

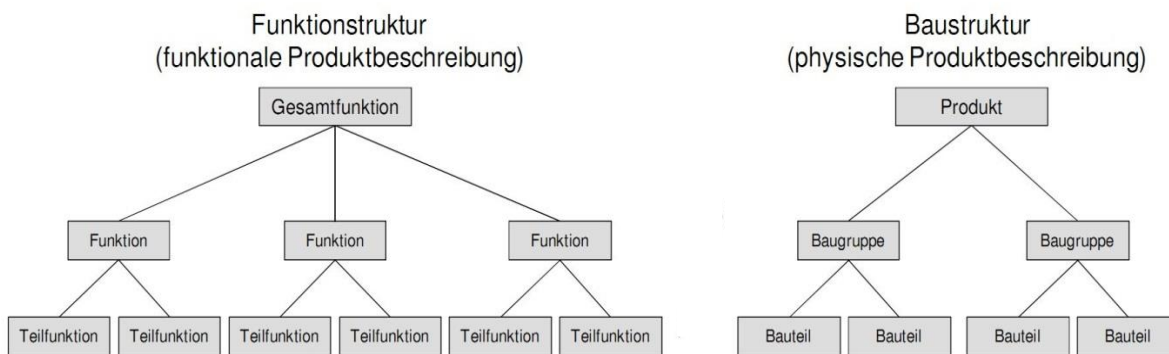


Abbildung 2-5: Hierarchische Darstellung eines Produktes und seiner Gesamtfunktion (GÖPFERT 2009)

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ebenen der Produktkonkretisierung des Münchener Produktkonkretisierungsmodells für die Beschreibung und Eingrenzung einer Produktarchitektur sowie für die Kategorisierung und Einordnung von Analyse- und Verbesserungsmaßnahmen verwendet. Außerdem sind auch die Detaillierungsebenen der Produktbeschreibung für die Einordnung des Anwendungsbereiches von Maßnahmen für die Produktarchitektur relevant.

2.2 Definitionen und Grundlagen zur Produktarchitektur

Wie im Kapitel 1.1.2 kurz erläutert wird, beschreibt die Produktstruktur den Aufbau eines Produkts aus seinen Komponenten, wobei das Produkt i.d.R. hierarchisch in Baugruppen und Bauteile zerlegt wird (SCHUH 2005, S.73). Die Produktstruktur kann dabei aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden, beispielsweise aus der funktionalen, physischen, fertigungs- oder montageorientierten Sicht (PAHL et al. 2006, S.554). Die Produktarchitektur stellt ein erweitertes Beschreibungsmodell für Produkte und ihre Produktkomponenten dar. Dabei beschreibt die Produktarchitektur nach ULRICH & EPPINGER 2004 (S.164) die Art der Zuordnung von Funktionen (also die einzelnen Vorgänge und Aufgaben) zu den individuellen physischen Einheiten, aus denen das Produkt aufgebaut ist. Abbildung 1-4 zeigt eine solche Zuordnung für ein Beispielsystem. PAHL et al. 2006 (S.684) beschreibt die Produktarchitektur als „das Beziehungsschema zwischen der Funktionsstruktur eines Produkts und seiner physikalischen Struktur, also der Baustuktur“. Der Begriff Produktstruktur kann somit als Funktionsstruktur oder als Baustuktur interpretiert werden, je nach dem, aus welcher Perspektive das Produkt betrachtet oder analysiert wird. Die Produktarchitektur beinhaltet, neben der Funktions- und Baustuktur auch deren gegenseitige Beziehungen. Die Zuordnung zwischen Funktionen und physischen Komponenten kann dabei eine Eins zu Eins Beziehung sein oder mehrere Funktionen werden von einer Komponente erfüllt bzw. umgekehrt.

ULRICH 1995 (S. 420) deutet darauf hin, dass die Produktarchitektur aus drei Merkmalen besteht: die Anordnung der Funktionselemente zu Funktionsstrukturen, die Abbildung von funktionalen Elementen oder Funktionsstrukturen zu physischen Komponenten und die Spezifikation der Schnittstellen zwischen interagierenden physischen Komponenten (ähnlich

Abbildung 2-6). Über die Darstellung der Produktarchitektur erlangt man Einblicke in die Art und Weise, wie die einzelnen Komponenten und Baugruppen auf physikalischer Ebene den Funktionen und Teilfunktionen zugeordnet werden (PAHL et al. 2006). Zur Visualisierung der Struktur und Architektur des Produktes oder Systems dienen dabei verschiedene Visualisierungsstrategien. Je nachdem, welche Aspekte genauer beleuchtet werden sollen, können die entsprechenden Methoden ausgewählt und angewendet werden.

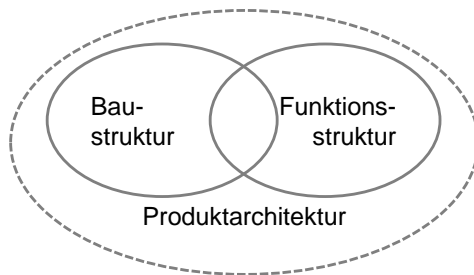


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der relevanten Betrachtungsdomänen einer Produktarchitektur (FELDHUSEN 2006)

MARTIN M. (2002) stellt eine erweiterte Betrachtung der Produktarchitektur vor und beschreibt, dass auch Produktfamilien eine Architektur besitzen. Die Architektur der Produktfamilie beschreibt dabei, dass die unterschiedlichen Produkte der Familie eine gemeinsame oder ähnliche Funktions- und Baustruktur besitzen. Darüber hinaus ist die Zuordnung von Funktionen zu den physischen Komponenten ebenfalls gemeinsam sowie die Schnittstellen und Interaktionen zwischen physischen Komponenten.

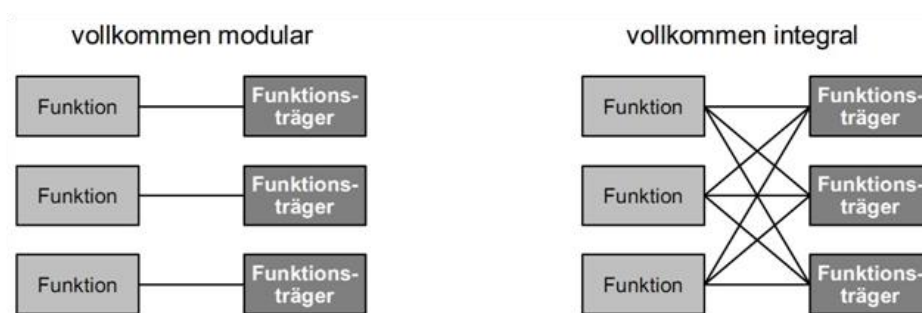


Abbildung 2-7: Aufbau von modularen und integralen Produktarchitekturen (RENNER 2007, S. 126)

Modularität und Integralität sind hierbei die beiden Schlüsselmerkmale, über welche die Architektur genauer definiert werden kann. Bei einem ideal modularen System wird je einer Teilfunktion genau eine Komponente zugewiesen, während bei einer integralen Architektur mehrere Funktionen auf eine Komponente gebündelt sind (vgl. Abbildung 2-7).

Allgemein sind von der Auswahl der Produktarchitektur oftmals weite Teile des ganzen Unternehmens mittelbar oder direkt betroffen: Änderungen, Varietät, Verhalten und Fertigbarkeit des Produktes sind nur einige der von der Architektur abhängigen Größen (Ulrich

& Eppinger 2004, S.167). Dagegen zeichnet sich ein System ganz allgemein durch seine Abgrenzbarkeit von seiner Umwelt aus, die progressive Aufteilung in Subsysteme geht bis auf Elementebene (Göpfert 2009, S.12).

Die Systemarchitektur ist demgemäß die abstrakte Struktur des Aufbaus einer Gesamtheit von miteinander in Verbindung stehenden Elementen, welche durch die vertikalen hierarchischen Beziehungen und das horizontale Relationsgeflecht definiert wird (GÖPFERT 2009, vgl. Abbildung 2-8). Dabei stellt die Systemarchitektur eine Abstraktion der Produktarchitektur dar. Während die Produktarchitektur also die funktionalen Abhängigkeiten des physikalischen Blocks eines Produkts beschreibt, ist die Systemarchitektur aufgrund ihrer Abstraktheit auch auf Organisations- und Prozessebene übertrag- und anwendbar (GÖPFERT 2009). Da Produkt- und Prozessebene allerdings miteinander in Wechselwirkung stehen, ist es elementar, über die Möglichkeiten und Folgen eines Eingriffs in die Produktarchitektur beziehungsweise in die Organisationsstruktur Bescheid zu wissen.

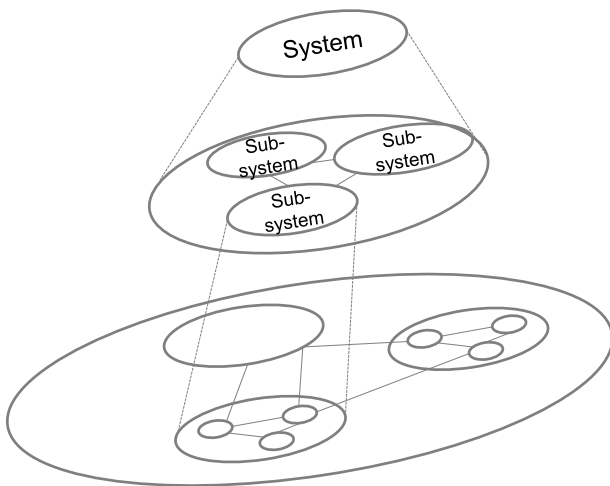


Abbildung 2-8: Horizontale und vertikale Beziehungen einer Systemarchitektur (GÖPFERT 2009, S. 23)

Produktarchitektur im Kontext dieser Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit umfasst der Begriff Produktarchitektur sowohl die Baustruktur als auch die Funktionsstruktur und deren Zuordnungen. Darüber hinaus und je nach Ausgangssituation werden Produktvarianten berücksichtigt, wie auch bei MARTIN M. (2002). Dabei wird die Betrachtungsdomäne der Varianten (s. auch Kap. 1.1.2) vom Groben ins Detail erfasst und in die Modellierung der Produktarchitektur mit einbezogen. Folglich ist es dann ersichtlich, auf welcher Ebene der Baustruktur die Variantengenerierung beginnt und welche physischen Komponenten produktfamilienübergreifend von allen Produktvarianten verwendet werden.

Wie auch GÖPFERT (2009) in seiner Arbeit beschreibt, steht die Produktarchitektur in Wechselwirkung mit sämtlichen Prozessen und weiteren Strukturen, wie die Organisationsstruktur. Hierbei stellt der Montageprozess eines technischen Produktes oder einer Produktfamilie einen wesentlichen Einflussparameter und teilweise sogar eine

Randbedingung für die Produktarchitektur dar. Aufgrund dessen wird der Montageprozess im Kontext dieser Arbeit als Teil der Produktarchitektur gesehen und bei der Analyse berücksichtigt. Dabei wird Baustruktur nicht nur hierarchisch, sondern auch nach der Montageabfolge erfasst und modelliert. Unter simultaner Berücksichtigung von Produkt- und Komponentenvarianten wird aus dem Modell der Produktarchitektur ersichtlich, wann die Variantengenerierung bezogen auf den Montageprozess beginnt.

Zusammenfassend werden der Betrachtungsraum einer Produktarchitektur und daher auch der Modellierungsumfang je nach konkretem Fall angepasst. Dabei kann das Modell der Produktarchitektur außer den Sichtweisen der Funktions- und Baustruktur und deren Zusammenhänge sowohl die Betrachtungsdomäne der Varianten auf Produkt- und Komponentenebene als auch Informationen über den Montageprozess abbilden.

Im nächsten Abschnitt wird ein detaillierter Einblick in die unterschiedlichen Arten von Produktarchitekturen und deren Kategorisierung gegeben, wie aus der gängigen Literatur hervorgeht. Es wird auch gezeigt, welche Kategorie und Arten von Produktarchitekturen für das Analyseverfahren dieser Arbeit von Relevanz sind und welche Eingriffsmöglichkeiten existieren, um eine bestimmte Produktarchitektur zu implementieren beziehungsweise zu optimieren.

2.3 Arten von Produktarchitekturen

Im letzten Abschnitt wurden die Grundlagen über die Produkt- und Systemarchitektur gegeben. Daraus abgeleitet, wurde der Begriff Produktarchitektur im Kontext dieser Arbeit definiert. In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Architekturarten vorgestellt sowie auf welchen Konkretisierungs- und Abstraktionsebenen sie Anwendung finden. Außerdem sollen ihre Vor- und Nachteile behandelt werden.

Wie auch im vorherigen Abschnitt kurz erwähnt, sind Modularität und Integralität die beiden Schlüsselmerkmale, die eine Architektur beschreiben. Ausgehend von diesen Merkmalen definiert man zwei übergeordnete Kategorien der Produktarchitektur. Die Integral- und die Differenzialarchitektur.

Bei der physischen Gestalt eines Produktes beschreiben PONN & LINDEMANN (2011) als Integralbauweise die Zusammenführung von mehreren, aus einem einheitlichen Werkstoff bestehenden Einzelteilen zu einem Werkstück, während die Auflösung eines Werkstückes in mehreren Einzelteilen als Differentialbauweise verstanden wird (vgl. Abbildung 2-7 und Abbildung 2-9). Bei dieser Betrachtung bezieht sich der Unterschied der Strukturen auf die Bauebene und deswegen spricht man von einer Integral- oder Differentialbauweise. Zieht man auch die Funktionsebene in die Betrachtung mit ein, so unterscheidet man gleichermaßen zwischen Funktionsintegration und Funktionsdifferenzierung (EHRENSPIEL 2009). Bei der Betrachtung der Produktarchitektur werden beide Abstraktionsebenen berücksichtigt, die bei der Produktgestaltung und -analyse eine tragende Rolle besitzen (STONE et al. 2000, S. 6).

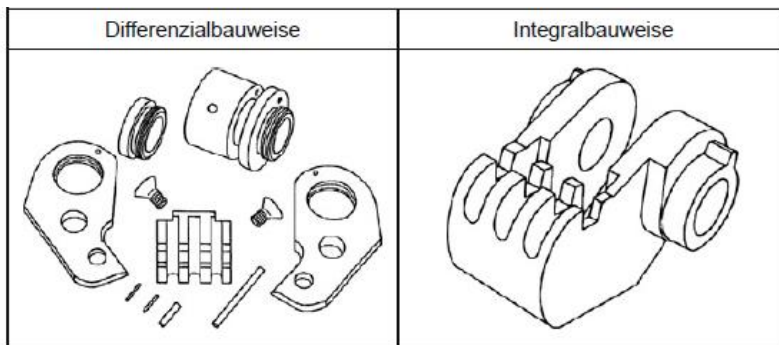


Abbildung 2-9: Differenzial- und Integralbauweise nach EHRENSPIEL 2009, S. 475

2.3.1 Integralarchitektur

Hauptmerkmal einer Integralarchitektur ist die Zuordnung mehrerer Funktionen einer physischen Komponente, die auch als Funktionsintegration beschrieben wird (EHRENSPIEL 2009). Um das zu ermöglichen, besitzen die Bauteile einer Integralarchitektur eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionselemente (s. auch Kap. 1.2, S. 16). Aus diesem Grund kommen je nach Fertigungsart¹⁴ nur bestimmte Fertigungsverfahren in Frage, wie zum Beispiel Gießen, Strangpressen oder Schmieden (PAHL et al. 2006, S. 450.).

Insbesondere auf der Bauebene bietet die Integralarchitektur bei Serien- oder Massenfertigung Vorteile, die zu einer Kostensenkung führen. Grund dafür sind Skaleneffekte bei der Produktion größerer Stückzahlen, der verringerte Montageaufwand, reduzierte Materialkosten sowie die Aufwandreduzierung bei der Verwaltung mehrerer unterschiedlicher Bauteile (EHRENSPIEL 2009, PAHL et al. 2006, S. 451). Im Gegensatz dazu steigen bei der Integralbauweise und –architektur Kosten für Formen und Werkzeuge. Die Entscheidung hängt von der Stückzahl und (geometrischen) Komplexität des Bauteils ab (PAHL et al. 2006, S. 602). Ein weiterer Vorteil der Integralarchitektur stellt die Möglichkeit einer globalen Produktleistungsoptimierung dar aufgrund der genau abgestimmten Schnittstellen zwischen den physischen Komponenten (ULRICH 1995, S. 432).

Nachteilig bei der Integralarchitektur ist die Erhöhung der Komplexität der Produktstruktur hinsichtlich der Anzahl und Verschiedenheit der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den physischen Komponenten des Produkts (PONN & LINDEMANN 2011). Da die Architektur größtenteils festlegt, inwiefern das Produkt geändert bzw. angepasst werden kann, führt die hohe Komplexität der Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen zur Reduzierung der Änderungsflexibilität einzelner Funktionen oder Bauteile. Bei einer Integralarchitektur würde bereits eine kleine Änderung oder Anpassung an ein Bauteil oder Funktion an die in direkter Wechselwirkung stehenden Bauteilen fortpflanzen. Das würde wiederum bedeuten, dass die

¹⁴ Hauptmerkmal der Fertigungsart in diesem Kontext ist die Anzahl der herzustellenden Teile. Man unterscheidet also zwischen Einzel-, Klein-, Serien- und Massenfertigung.

Änderung durch das gesamte Produkt propagieren würde, was eine Anpassung des gesamten Produkts und folglich einen erhöhten Aufwand und Kosten zur Folge haben würde (ULRICH 1995, S. 426).

2.3.2 Differenzialarchitektur

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Arten von Differenzialarchitekturen näher vorgestellt. Davor werden kurz ihre allgemeinen Merkmale und ihre Vor- und Nachteile behandelt. Daraus können dann verschiedene Eingriffsmöglichkeiten für die Verbesserung einer bestimmten Produktarchitektur abgeleitet werden.

Differenzialarchitekturen beziehungsweise –bauweisen können weiter in Verbund- und Bausteinbauweise unterschieden werden. Bei der Verbundbauweise werden mehrere unterschiedlich gefertigte Bauteile zu einem Werkstück unlösbar verbunden. Dabei werden unterschiedliche Fügeverfahren für die Verbindung der Werkstücke angewendet und gleichzeitig werden mehrere unterschiedliche Werkstoffe benutzt, um ihre jeweilige Eigenschaften optimal zu nutzen (PAHL et al. 2006, S. 452). Bei der Bausteinbauweise (vgl. auch Baukästen) erfolgt die Auflösung der Baustruktur so, dass die Bauteile auch von anderen Produkten innerhalb einer Produktfamilie oder des Produktprogramms und entlang der Variantenvielfalt angewendet werden können (PAHL et al. 2006, S. 453, SCHUH 2005, S. 125). Bei diesen Standardteilen auf der Teileebene der Baustruktur spricht man von Gleich- oder Wiederholteilen, die in den nächsten Abschnitten näher behandelt werden.

Wichtig anzumerken ist, dass die in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise und Methodik die Analyse und Verbesserung von Differenzialarchitekturen betrifft. Sonach wird auf diesem Abschnitt ein besonderes Augenmerk gelegt.

Vor- und Nachteile der Differentialarchitekturen

Bezogen auf die Fertigungsart, besitzen Differenzialarchitekturen laut EHRENSPIEL (2009) ihre Vorteile hauptsächlich bei der Einzel- und Kleinserienfertigung. Nichtsdestotrotz ist es durch die richtige Umsetzung moderner Fertigungsstrategien möglich, Differenzialarchitekturen mit Kostenvorteilen auch bei Serienfertigung einzusetzen (PILLER & WARINGER 1999, S. 65). Kostenvorteile werden durch Differenzialarchitekturen in der Serienfertigung vor allem dann erzielt, wenn ein Produkt oder eine Produktfamilie langfristig änderungsfähig und anpassbar an neue Kundenwünsche und Anforderungen bleiben muss. Bei diesem Konzept lassen sich Produkte, die auf die individuellen Bedürfnisse der Kunden abgestimmt sind, zu vergleichbaren Kosten, wie bei einer Massenfertigung, produzieren. Ein Beispiel dafür ist die Automobilindustrie (PILLER & WARINGER 1999, S. 65).

Weitere Vorteile solcher Produktarchitekturen finden sich in den reduzierten Durchlaufzeiten und somit reduzierten Kosten des Entwicklungsprozesses bei Anpass- oder Variantenkonstruktionen. Durch die Reduzierung der Komplexität in den Wechselwirkungen zwischen den physischen Komponenten und Verringerung der Fortpflanzung von Änderungen, lässt sich nicht nur die Anpassungsfähigkeit des Produkts oder der Produktfamilie an neue Randbedingungen erhöhen, sondern auch die Produktqualität verbessern. Grund dafür ist der erhöhte Einsatz und die Wiederverwendung von bereits bewährten Bauteilen, Baugruppen und

auch von konstruktiven Lösungen (DANIILIDIS et al. 2011a). Die erhöhte Anpassungs- und Änderungsfähigkeit von Differenzialarchitekturen ist auch bezüglich der Leistungsoptimierung einer Baugruppe oder Funktionseinheit eines Produkts von Vorteil. Allerdings ist eine Gesamtoptimierung nur schwer durchzuführen (ULRICH 1995, S. 432)

Da produzierende Unternehmen in der heutigen Konsumgesellschaft nicht nur schnell, sondern auch zu geringen Entwicklungs- und Produktionskosten auf Kundenwünsche reagieren müssen, sind auch modernere Marktforschungsinstrumente erforderlich (NADLER 2012). Ein Beispiel dafür ist das Echtzeit-Marktforschungskonzept (Real-time-Market Research) nach SANCHEZ & SUDHARSHAN (1993). Dabei wird das Produkt auf den Markt gebracht, um die ersten Reaktionen der Kunden zu ermitteln und anschließend das Produkt gemäß den Kundenwünschen anzupassen. Solche Konzepte erfordern für ihre Verwirklichung eine Differenzialarchitektur.

Darüber hinaus bieten Differenzialarchitekturen einen Ansatz, um bei variantenreichen Produkten die interne Variantenvielfalt und Komplexität eines Unternehmens zu reduzieren ohne dabei die externe Variantenvielfalt negativ zu beeinflussen (DANIILIDIS et al. 2011a).

PAHL et al. (2006, S. 447) schildern auch die Vorteile von Differenzialarchitekturen bezüglich der Möglichkeit der unabhängigen Beschaffung von Materialien und Halbzeugen, was die Beschaffungssituation eines Unternehmens verbessern kann. Ferner ist auch eine auftragsunabhängige Fertigung von Bauteilen möglich sowie eine bessere Parallelisierung von Fertigungsschritten möglich, um reduzierte Fertigungs-Durchlaufzeiten zu erzielen. Nachteilig dagegen ist der erhöhte Montageaufwand. Zusätzlich sind bei Differenzialarchitekturen Schnittstellen (beispielsweise Fügstellen) mit kleineren Toleranzen zu realisieren, was auch einen erhöhten Qualitätssicherungsaufwand mit sich bringt.

Letztlich listen GERSHENSON et al. (2003) in ihrer Arbeit weitere Vorteile sowie Nachteile und Anwendungsmöglichkeiten von Differenzialarchitekturen auf.

In den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Arten von Differentialarchitekturen und –bauweisen näher vorgestellt und beschrieben. Wichtig ist dabei anzumerken, dass auch Mischformen dieser Architekturarten implementiert werden können, um dadurch die jeweiligen Stärken und Vorteile zu Nutze zu machen. Durch die Anwendung solcher Mischstrukturen werden auch zahlreiche Eingriffsmöglichkeiten für die Verbesserung einer Produktarchitektur angeboten. Diese werden im letzten Teilabschnitt dieses Kapitels übersichtlich dargestellt.

Baureihen

Baureihen sind ein Rationalisierungsansatz für Produktarchitekturen und Entwicklungen, bei denen die gleiche Funktion und Funktionalität¹⁵ des Produktes mit dem gleichen konstruktiven Lösungskonzept und –architektur und möglichst gleichen Eigenschaften für einen breiteren Größenbereich zu erfüllen ist (PAHL et al. 2006, S. 662). Dabei zeichnen sich Baureihen durch das gleiche Baumuster unterschiedlicher Größe aus und werden weitestgehend auf die gleiche Art gefertigt (SCHUH 2005, S. 127). Nachdem ein Grundprodukt, z.B. eine Maschine oder eine

¹⁵ Als Funktionalität wird in diesem Zusammenhang die Gesamtfunktion des Produktes gemeint

Baugruppe, beispielsweise ein Getriebe, entworfen wurde, können daraus mit Hilfe von Ähnlichkeitsgesetzen weitere Elemente der Baureihe abgeleitet werden. Dabei ist es wichtig, neben reinen geometrischen Aspekten gegebenenfalls auch zusätzliche Faktoren wie zum Beispiel elektrische oder thermische Ähnlichkeit zu erfüllen (PAHL et al. 2006, S. 630). Der Zweck von Baureihen besteht hauptsächlich darin, Lösungen zur Erfüllung bestimmter Funktionen bereits existierender Produkte in einer anderen Größenordnung abzuleiten. Typische Beispiele dafür sind Motoren, Getriebe oder Aggregate (SCHUH 2005, S. 127).

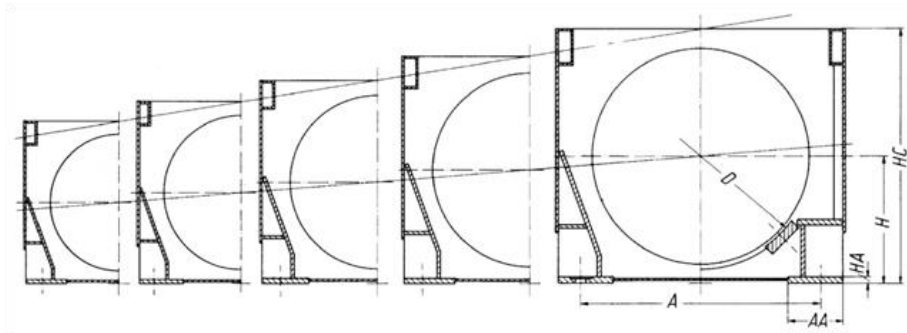


Abbildung 2-10: Geometrisch gestufte Baureihe eines Elektromotorgehäuses (PAHL et al. 2006, S. 659)

Baureihen stellen also eine Maßnahme beziehungsweise eine Eingriffsmöglichkeit auf die Produkt- oder Baugruppenebene einer Produktarchitektur dar. Wie auch SCHUH & SCHWENK (2001) in seiner Arbeit beschreibt, beziehen sich Baureihen nur auf einen Teilaspekt der Produktarchitektur und nicht auf alle Dimensionen und Ebenen. Auf diese Weise kann eine Aussage gemacht werden, welche Eigenschaften ein Produkt besitzen muss und wie die Produktarchitektur auf der Produktebene zu realisieren ist, aber nicht aus welchen Elementen es bestehen soll und wie sie und seine Funktionen strukturiert sind.

Mit der Anwendung von Baureihenarchitekturen ergeben sich sowohl für den Hersteller als auch für den Anwender Vorteile. Für den Hersteller werden Skaleneffekte in der Fertigung durch die Erhöhung bestimmter Losgrößen realisiert und dadurch wird die Herstellung wirtschaftlicher (GERHARD 1984). Überdies ergeben sich auch für die Entwicklung und Konstruktion Kostenvorteile aufgrund der einmaligen Leistung von konstruktiver Arbeit für viele Anwendungsfälle. Dadurch ist auch eine höhere Produktqualität realisierbar (PAHL et al. 2006, S. 629). Hauptvorteil für den Anwender sind dabei geringere Kosten für höhere Qualität sowie kürzere Lieferzeiten. Obendrein gestaltet sich die Anschaffung von Ersatzteilen einfacher und die Wartungskosten preisgünstiger (PAHL et al. 2006, S. 629).

Nachteilig bei Baureihen sind meistens die eingeschränkte Größenwahl mit nicht immer optimalen Betriebseigenschaften sowie die eingeschränkte Auswahl an unterschiedlichen Funktionen (PAHL et al. 2006, S. 629).

Baukästen

Baukästen und modulares Design werden schon seit den 60er Jahren angewendet. Anfangs in der IT-Branche und nachfolgend auch in anderen Industriezweigen, wie zum Beispiel die

Automobilindustrie (BOROWSKI 1961). Elementar für die zunehmende Bedeutung des Baukastens und somit Haupttreiber für seinen Erfolg ist sicherlich der breite Anwendungs- und Einflussbereich. Sowohl die Bereiche Produktplanung sowie Entwicklung & Konstruktion, als auch Produktion und Auftragsabwicklung können bei adäquater Anwendung vom Baukastenprinzip auf wirtschaftlicher, aber auch auf Organisationsebene profitieren (PILLER & WARINGER 1999, FELDHUSEN 2011). Schafft man es, das grundlegende Ziel des Baukastens, also minimierte Anzahl an Einzelteilen bei maximierter oder gleich bleibender Anzahl an Gesamtvarianten/-funktionen, zumindest teilweise zu erreichen, so hat dies weitreichende, zumeist positive Auswirkungen auf die Komplexität in der Struktur und Organisation eines Produktes (PAHL et al. 2006, S. 663). Durch die richtige Anwendung bietet der Baukasten also Potential, den maximalen Nutzen für den Anwender bei gleichzeitiger Reduktion und Beherrschung von Komplexität und Kosten innerhalb des Unternehmens zu erreichen (PILLER & WARINGER 1999, KOHLHASE 1997).

Der wesentliche Unterschied zu den Baureihen besteht darin, dass die durch den Baukasten unterschiedlich realisierten Produkte nicht die gleichen Funktionen besitzen. Sind also in einem Produktprogramm unterschiedliche Größenstufungen verschiedener Funktionen und in verschiedenen Kombinationen zu realisieren, so besteht die Aufgabe des Baukastens, die jeweils geforderte *Funktionsvariante* durch Kombination festgelegter Einzelteile und/oder Baugruppen (*Funktionsbausteine*) auszuführen (PAHL et al. 2006, S. 662). Die Kombinierbarkeit der Bausteine zu ganzen Produkten bestimmt dabei die externe Variantenvielfalt, die mit dem Baukasten realisiert werden kann (ZAGEL 2010). Durch mehrere Größenstufen von Bausteinen enthalten Baukästen oft auch Baureihen. Die Bausteine sollen dabei nach möglichst ähnlicher Technologie gefertigt werden.

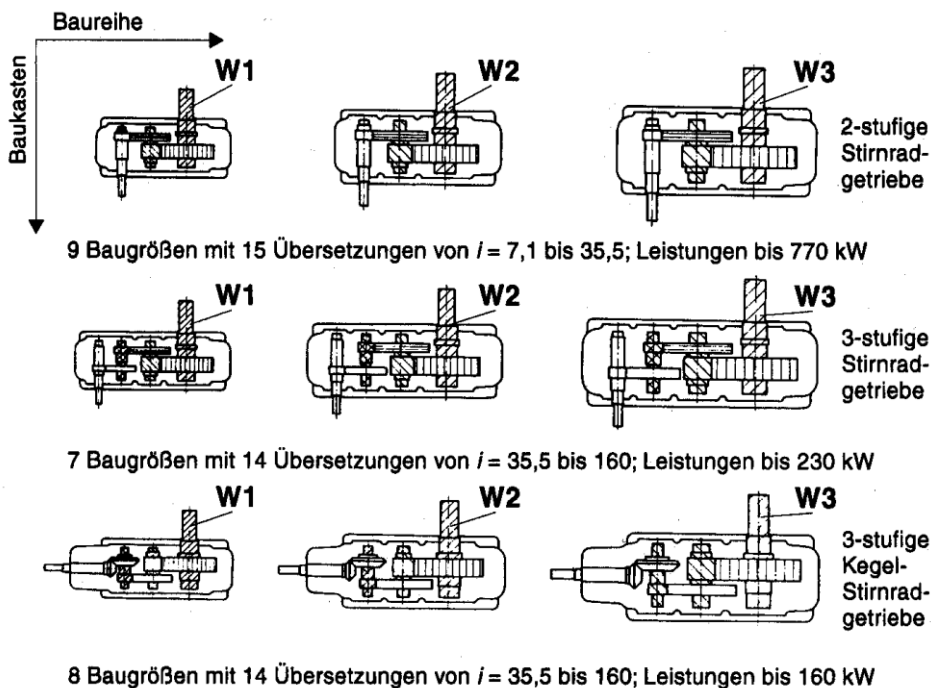


Abbildung 2-11: Baukasten eines Zahnradgetriebes mit unterschiedlichen Größenstufungen (Baureihen) (EHRENSPIEL 2009)

Für BOROWSKI (1961) ist das Baukastenprinzip ein „Ordnungsschema“, das gemäß eines dazugehörigen Bauplans oder Baumusters den Aufbau einer begrenzten Zahl verschiedener Dinge aus einer Sammlung genormter Bausteine in einem Anwendungsbereich festlegt (BOROWSKI 1961, S. 18). Ähnlich bezeichnet EHRENSPIEL (2009) den Baukasten als ein „Kombinationsprinzip“, mit dem verschiedene Gesamtfunktionen und -varianten eines Produktes implementiert werden können. Laut SCHUH & SCHWENK (2001) sind Baukästen durch einen oder wenige Grundkörper und unterschiedlich variantenreiche Anbauteile oder –baugruppen charakterisiert, die in unterschiedliche Montagestufen montiert werden. Eine etwas abstraktere Definition liefern ULRICH & EPPINGER (2004), bei denen in modularen Produktarchitekturen physikalische Komponenten oder Einheiten ein funktionales Element eines Produktes umsetzen, wobei der exakten Schnittstellendefinition besondere Bedeutung zukommen muss (ULRICH & EPPINGER 2004). Hierbei ist es wichtig anzumerken, dass der Begriff Baukasten (engl. *modular design*) oft in der Literatur synonym mit der modularen Architektur verwendet wird (ULRICH 1995). Außerdem gibt es zahlreiche fachbereichsspezifische Darstellungen. Beispielfhaft werden hier PILLER & WARINGER (1999) erwähnt, die Fahrzeugmodule¹⁶ als „abgrenzbare und einbaufertige Einheit“, zusammengesetzt aus physisch miteinander verbundenen Bausteinen verstehen (PILLER & WARINGER 1999). Grundlegende Zielrichtung ist dabei immer, möglichst viele Varianten und Funktionen mit möglichst wenigen Bausteinen definieren zu können (LINDEMANN 2009, BRAUN et al. 2013). PAHL et al. (2006, S. 662) verstehen unter einem Baukasten Maschinen, Baugruppen und Einzelteile, die als Bausteine mit oft unterschiedlichen Lösungen durch Kombination verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen.

Über die Bausteine eines Baukastens hat man die Möglichkeit, diesen genauer zu spezifizieren. Gleichzeitig kann man bei den Bausteinen je nach Anforderungs- und Anwendungsbereich zwischen Funktions- und Fertigungsbausteinen unterscheiden (PAHL et al. 2006, S. 663). Fertigungsbausteine werden nach fertigungstechnischen Gesichtspunkten unabhängig von der jeweiligen zu erfüllenden Funktion definiert. Dahingegen werden Funktionsbausteine aus der Perspektive der Realisierung der jeweiligen Funktionen definiert. Bei dieser Aufteilung kann jeder Baustein eine oder mehrere Funktionen erfüllen. Darüber hinaus werden Funktionsbausteine weiter anhand der Art ihrer Funktion in Grund-, Hilfs-, Sonder- und Anpassbausteine aufgeteilt. Auf diese Weise bilden Grundbausteine die Grundfunktion eines Produktes. Durch Sonderbausteine können dann ergänzende und anwendungsspezifische Funktionen einer Produktvariante realisiert werden (PAHL et al. 2006, S. 665). Eine weitere Kategorisierung der Bausteine erfolgt anhand deren Bedeutung. PAHL et al. (2006) legen zwei Arten fest; die Muss- und Kann-Bausteinen. In diesem Sinne kann ein Grundbaustein auch ein Muss-Baustein sein und somit die Grundfunktion aller durch den Baukasten realisierbaren Produktvarianten darstellen. Eine ähnliche übersichtliche Klassifikation der Bausteine eines Baukastens bietet auch RENNER (1997) in seiner Arbeit. KOHLHASE (1997) hingegen unterscheidet zwischen elementaren und konfigurierten Bausteinen. Weitere Kategorisierungen

¹⁶ Die dabei benutzten Begriffe von Modul und modulare Architektur werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

von Baukastenelementen können in der Literatur gefunden werden. Eine Übersicht liefern BRAUN et al. (2013, S. 26) in ihrer Arbeit.

Analog zu der Definition von Systemgrenzen lassen sich auch für Baukästen Grenzen festlegen. Demnach kann man zwischen geschlossenen Ausführungen, die nur eine begrenzte Zahl an Varianten und Gesamtfunktionen umsetzen können, und offenen Baukästen unterscheiden, deren theoretisch mögliche Variantenzahl unbegrenzt ist (PAHL et al. 2006). Nach EHRENSPIEL (2009) besitzen offene Baukästen wie z.B. Küchenmöbel oder Baugerüstsysteme lediglich einen Baumusterplan mit einigen Anwendungsbeispielen, wohingegen im Bauplan eines geschlossenen Baukastens, wie z.B. ein Werkzeugkasten für Drehmomentschlüssel, alle möglichen Varianten dargestellt sind (EHRENSPIEL 2009).

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erwähnt, zielen Baukästen auf Synergieeffekte im gesamten Produktprogramm (PONN & LINDEMANN 2011, S. 252). Zudem sind Baukästen auf verschiedenen Konkretisierungs- und Abstraktionsebenen eines Produkts anwendbar. Hauptvorteil von Baukastensystemen ist für den Hersteller die Erhöhung der gefertigten Stückzahlen und die damit verbundene Kostensenkung und Qualitätserhöhung. Das ist dann der Fall, wenn das geforderte Spektrum an externe Variantenvielfalt durch einen oder nur wenige Grund- und Zusatzbausteine auf der Baugruppenebene realisiert werden kann, also durch eine wesentlich reduzierte interne Variantenvielfalt im Verhältnis zu Einzellösungen und -konstruktionen (PAHL et al. 2006, S. 663, RENNER 2007, S. 3, KOHLHASE 1997, S. 211). Je öfter sich die Bausteine für verschiedene Konfigurationen benutzen lassen, desto vorteilhafter sei das Baukastensystem (BOROWSKI 1961). Dadurch verteilen sich die Gemeinkosten auf ein breiteres Bauteilspektrum (EHRENSPIEL 2009). Ferner kann die interne Variantenvielfalt durch die Verwendung von Gleich- und Wiederholbauteilen auf der Komponentenebene weiter reduziert werden. Damit aber eine Baukastenentwicklung wirtschaftlich ist, muss eine relativ hohe Anzahl von Funktionsvarianten und eine breite externe Variantenvielfalt vom Markt verlangt werden (PAHL et al. 2006).

Aus der Anwenderseite bieten sich ebenfalls verschiedene Vorteile. Außer dem besseren Preis-/Leistungsverhältnis wird dem Anwender eine erhöhte Flexibilität hinsichtlich des Nachrüstens sowie günstigere Instandhaltung geboten. Darüber hinaus wird auch eine Lieferzeitverkürzung durch die verringerten Bearbeitungszeiten erreicht (EHRENSPIEL 2009).

Dazu bieten Baukästen je nach der Breite des Anwendungsbereiches auch in anderen Unternehmensbereichen Vorteile, die indirekt zur Kostensenkung und Komplexitätsreduzierung führen können. Auch PILLER & WARINGER (1999, S. 79) erkennen klare Chancen für diverse Unternehmensbereiche. Beispielsweise könne durch Baukästen die Transparenz in der Entwicklung erhöht werden, da die Produktstruktur vereinfacht und somit die Komplexität beherrschbar wird. Außerdem kann besser auf Anforderungen und Änderungen des Marktes reagiert werden. Die standardisierten Elemente führen zu Skaleneffekten in der Produktion und dem Einkauf, sowie einer vereinfachten und effektiveren Qualitätssicherung durch ausgereifere Produkte.

Des Weiteren gibt es noch weitere Potentiale bei der nachträglichen Produktänderung. Diese können aufgrund von Fehlerbehebungen oder auch im Rahmen der zyklischen Produktportfolioüberarbeitung und -modernisierung nötig werden (ULRICH 1995). Eine

weitgehende Entkoppelung von Einzelfunktionen vereinfacht zudem Entwicklungsarbeit und Produkttests um ein Weiteres (ULRICH & TUNG 1991).

Auch GÖPFERT erkennt diese Potentiale bei der Lösungssuche auf technischer sowie auch organisatorischer Ebene (GÖPFERT 2009, S. 94). Dezentrale Entscheidungsprozesse und überschaubare, kleine Einheiten charakterisieren dabei modulare Organisationsprozesse grundlegend (PILLER & WARINGER 1999).

Hingegen sind Anpassungen an spezielle Kundenwünsche nicht so umfangreich möglich wie bei einer Einzelfertigung. Dabei entsteht das Risiko eines Flexibilität- und Marktorientierungsverlustes (PAHL et al. 2006). PAHL et al. (2006, S. 678) bieten in ihrer Arbeit eine detaillierte Auflistung und Beschreibung weiterer Vor- und Nachteile von Baukastenbauweisen sowie eine Beschreibung über die Grenzen der Anwendung von Baukastensystemen.

Baukästen können auf verschiedenen Ebenen der Produktkonkretisierung (z.B. Funktions-, Produktebene) sowie aus unterschiedlichen Perspektiven und nach unterschiedlichen Anforderungen (z.B. fertigungs-, funktions-, kundenorientiert) entwickelt und eingesetzt werden. Je nach Anwendungsumfang und Zielsetzung können mittels Baukastenstrukturen auf unterschiedlichen Unternehmensbereichen Vorteile erzielt werden. RENNER (2007) fasst die möglichen Einflussbereiche eines Baukastens zusammen und gibt die jeweiligen übergeordneten Ziele an (s. Abbildung 2-12).

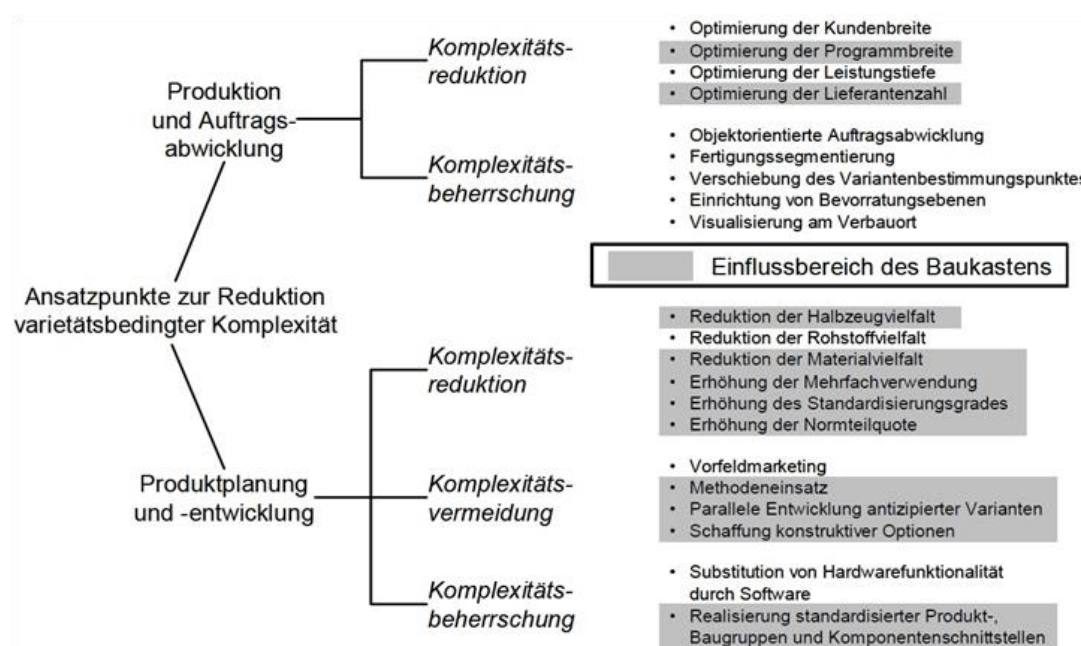


Abbildung 2-12: Mögliche Einflussbereiche und Vorteile eines Baukastens (RENNER 2007, S. 46)

Plattformstrukturen

Plattformen sind auf Produktebene vereinheitlichte Trägerstrukturen, die quer über die Produktfamilie keinerlei Differenzierungsmerkmale aufweisen (PONN & LINDEMANN 2011). Demnach gehören in Produktstrukturen diejenigen Komponenten zur Plattform, die unabhängig von den einzelnen Varianten zum Endprodukt gehören (KALIGEROS et al. 2006, S. 2). Die Spezialisierung auf Kundenwünsche, also die externe Variantenvielfalt, ergibt sich lediglich durch einen angefügten sogenannten „Hut“. Exemplarisch sei die Anwendung in der Automobilbranche erwähnt, wo zum Beispiel beim VW-Konzern eine Plattform für verschiedene Modelle wie VW Golf, Seat Toledo, Skoda Octavia oder Audi A3 verwendet wird und die Möglichkeit zur äußerlichen Unterscheidung durch den Kunden überwiegend durch den Hut, also etwa die Karosserie und das Interieur, ermöglicht wird (RENNER 2007). Obwohl die Trägerstruktur nicht verändert und somit auch nicht durch eine Funktionsvarianz charakterisiert wird, kann man sie dennoch als (Muss-) Baustein eines Baukastens, und die Plattformstrategie somit insgesamt als Sonderform des Baukastenprinzips, beziehungsweise der Modularisierung auf Teileebene auffassen (RENNER 2007).

Ein weiteres Beispiel hierfür sind PC-Motherboards (s. Abbildung 2-13). Ein Plattformprodukt wird aus funktionalen Gesichtspunkten festgelegt und bildet den größten gemeinsamen Nenner einer Produktfamilie (NADLER 2012).



Abbildung 2-13: PC-Motherboard. Beispiel für eine Produktplattform (NADLER 2012)

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von Plattformstrukturen ist Luftfahrtindustrie (BERGLUND et al. 2008).

Liegt den einzelnen Varianten einer Produktfamilie ein einheitliches Schema zugrunde, wie die Funktion eines Produktes den physikalischen Komponenten zugewiesen wird, so sprechen ULRICH & EPPINGER (2004, S. 180) von einer Plattformarchitektur. Auffällig ist die Vielfältigkeit der Definitionen, die stark vom jeweiligen Anwendungsbereich abhängen. So ist die Plattform zum Beispiel für den Automobilhersteller Volvo im Gegensatz zur vorliegenden funktionsorientierten Definition lediglich eine Möglichkeit, verschiedene Modelle auf einer einheitlichen Basis aufzubauen (WILDEMANN 2005, S. 155).

Nach SCHUH (2005, S. 133) wird mit Plattform „die Zusammenfassung derjenigen Komponenten, Schnittstellen und Funktionen bezeichnet, die über eine ganze Produktfamilie vereinheitlicht sind“. Eine Plattform kann also sowohl eine Komponente als auch eine Baugruppe von Komponenten sein. Somit ist die Plattformstrategie auch auf der Baugruppenebene der Produktstruktur übertragbar und anwendbar. Dabei beschreibt eine Produktplattform einen ausführungsneutralen und standardisierten Teil einer Produktarchitektur, der über standardisierten Schnittstellen verfügt und an dem die verschiedenen variantenspezifischen Komponenten oder Bausteine verbunden werden.

Plattformen und Baukastensysteme können aufgrund ihrer Eigenschaften nicht als identische Bauweisen beziehungsweise Produktarchitekturarten angesehen werden. Bei einer Plattformarchitektur entstehen die Produktvarianten nicht durch Kombination von mehreren vorausgedachten und standardisierten Bausteinen, wie bei einer Baukastensystematik der Fall ist, sondern durch die Konfiguration unterschiedlicher Komponenten und Baugruppen, die geeigneten Schnittstellen verfügen (PAHL et al. 2006, S. 686). Nichtsdestotrotz, kann die Plattformarchitektur als Teil einer Baukastenstrategie angesehen werden, um noch höhere Potenziale in der Produktion und Entwicklung auszuschöpfen.

Grundsätzlich zielt die Plattformstrategie auf Rationalisierungseffekte bei variantenreichen Produktfamilien, ähnlich mit den Vorteilen von Baukastenentwicklungen, die durch Herstellung von gleichen Teilen und Strukturen entstehen (PAHL et al. 2006, S. 686). Dabei entstehen Kostenvorteile in der Produktion durch Skaleneffekte und in der Entwicklung aufgrund des einmaligen Aufwandes für die Entwicklung und Konstruktion der Plattformen (PAHL et al. 2006, PILLER & WARINGER 1999, PONN & LINDEMANN 2011).

Allerdings ist die Umsetzung einer effizienten Plattformstrategie aufwändig, da die Plattform derart gestaltet und definiert werden muss, dass sie sich als Grundbaustein für mehrere Varianten eignet (RAPP 2010). Ähnlich mit den Baukastensystemen muss eine Plattformstrategie verschiedene Marktsegmente abdecken und eine breite externe Variantenvielfalt unterstützen (PILLER & WARINGER 1999).

Modulare Produktarchitektur

Modulare Produktarchitekturen werden oft synonym mit Baukastenstrukturen (engl. *modular design*) verwendet. Im Kontext dieser Arbeit wird aber der modularen Produktarchitektur eine übergeordnete und abstraktere Definition gegeben. Modulare Architekturen zielen nicht nur auf die Produktstruktur ab, sondern insbesondere auf die Festlegung von Modulen und Betrachtung der Schnittstellen zwischen den Modulen (ULRICH 1995). Dieses Merkmal unterscheidet modulare Architekturen von Baukästen, Baureihen und Plattformen (PONN & LINDEMANN 2011, S. 251). Zudem müssen die einzelnen Bausteine eines Baukastens nicht eigenständig eine bestimmte Funktion erfüllen. Stattdessen können sie auch beispielsweise als Hilfs-Bausteine erst in Kombination mit weiteren Einheiten funktionsfähig werden. Nichtsdestotrotz sind modulare Architekturen Voraussetzung für Baukastenentwicklungen und für die Verfolgung einer Baukastenstrategie (KIPP & KRAUSE 2008).

Im Gegensatz dazu definieren GERSHENSON et al. (2003) ein Modul als eine Einheit, die eine eindeutige Funktion erfüllt und für die Gesamtfunktionalität des Produktes notwendig ist. Demnach kann diese Einheit aus einer Komponente oder einer Gruppe von Komponenten

bestehen (ALLEN & CARLSON-SKALAK 1998). Somit ist ein Modul eine abgegrenzte, funktional und physisch beschreibbare Einheit, die über derart festgelegte Schnittstellen mit den restlichen Produktmodulen verfügt und von denen weitgehend unabhängig operiert und geprüft werden kann (PAHL et al. 2006, S. 685). Die Module sind also entkoppelt und können dann auch voneinander unabhängig entwickelt und produziert werden (PONN & LINDEMANN 2011, S. 444). Somit bietet eine modulare Produktarchitektur die Möglichkeit, Module innerhalb eines Produktes anzupassen beziehungsweise Änderungen an einem Modul vorzunehmen, ohne dass die restlichen Module beeinflusst werden. Außerdem können Module ausgetauscht werden, damit das Produkt kundenspezifische Funktionen erfüllen kann (ULRICH & EPPINGER 2004). Wichtig ist dabei, dass bei der Weiterentwicklung von Modulen keine Änderungen bei den Schnittstellen innerhalb der Produktfamilie vorgenommen werden (JIAO et al. 2007).

Die Modularität einer Produktarchitektur beziehungsweise eines Systems oder einer Struktur ist dann die graduelle Eigenschaft der Struktur, indem die Produktarchitektur aus Modulen zusammengesetzt wird (PAHL et al. 2006, S. 685, ALLEN & CARLSON-SKALAK 1998, ULRICH & TUNG 1991). Als Modularisierung wird das Gestaltungsprinzip zur Aufteilung einer Produktarchitektur in leicht austauschbare Module verstanden (PONN & LINDEMANN 2011, S. 444). Ziel dabei ist nicht die Maximierung der Modularität, was zur Erhöhung der Anzahl von Schnittstellen führen würde, sondern die Optimierung der Modularität je nach konkreter Zielsetzung (PAHL et al. 2006, S. 685).

Nach ULRICH & EPPINGER (2004) werden modulare Produktstrukturen gemäß der Art der Schnittstellen in folgende drei Klassen der Produktarchitektur eingeteilt und zugeordnet (siehe Abbildung 2-14), wobei eine eindeutige Zuordnung aufgrund von Überschneidungen oft nicht möglich ist:

- Die slot-modulare Architektur (siehe Abbildung 2-14 (a)), wo alle Schnittstellen der einzelnen Elemente unterschiedliche Ausprägungen haben, und die Einheiten somit nicht ohne weiteres untereinander ausgetauscht werden können (z.B. Autoradio)
- die bus-modulare Architektur (siehe Abbildung 2-14 (b)), mit der sich alle Untereinheiten über dieselbe Art von Schnittstelle auf dem gleichen Bus beziehungsweise auf der gleichen Plattform verbinden können (z.B. in der Computer-Hardware-Entwicklung)
- sowie die sektional-modulare Architektur (siehe Abbildung 2-14 (c)), bei der ebenfalls über die gleiche Schnittstellenart, jedoch mit jeweils unterschiedlichen Verbindungspartnern verbunden wird (z.B. Rohrleitungssysteme).

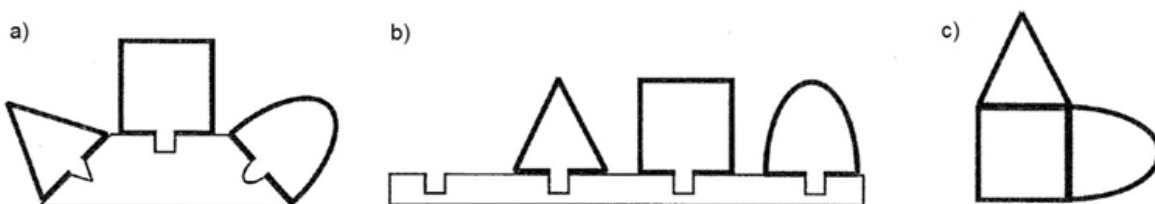


Abbildung 2-14: Drei Arten von modularen Produktarchitekturen (ULRICH & EPPINGER 2004)

Hauptvorteil modularer Produktarchitekturen ist die Unterstützung von Baukastenentwicklungen, der Definition von Plattformen und der Standardisierung, die, wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, zu Skaleneffekten in der Entwicklung und Produktion führen können (KIPP & KRAUSE 2008, S. 4). Ebenso sind Module oftmals Bestandteile eines Baukastens und stellen dessen Bausteine dar und können zusätzlich die Form einer Baureihe haben (FELDHUSEN 2011). Zusätzlich steht auch die Reduzierung von Durchlaufzeiten in der Fertigung und Montage im Vordergrund. Grund dieser Niedrighaltung von Durchlaufzeiten ist einerseits die Möglichkeit zur Parallelisierung der Montage- und Fertigungsprozessen von Modulen. Andererseits führt die Standardisierung zur Losgrößenerhöhung und demzufolge auch zur Auflagenerhöhung durch Mehrfachanwendung gleicher Teile (GERSHENSON et al. 2003, S. 305, PILLER & WARINGER 1999).

Im Bereich der Produktentwicklung ermöglicht die Modularität zu kontrollieren, inwieweit sich Veränderungen in den Prozessen oder Anforderungen auf das Produkt auswirken. Somit können Iterationen im Produktentstehungsprozess vermieden und dadurch Entwicklungskosten reduziert werden (GERSHENSON et al. 2003, S. 303).

Jedoch sind neben den vielen Vorteilen auch einige Nachteile zu finden. Somit kann eine ungeeignete Modularisierung zu steigenden Teilkosten aufgrund tendenzieller Überdimensionierungen führen (RAPP 2010, S. 60). Außerdem findet das Modularisierungsprinzip, wie auch das Baukastenprinzip, seine Grenzen bei der externen Variantenvielfalt der Endprodukte. Folglich ist das Ziel modularer Produktarchitekturen eine möglichst breite externe Heterogenität mit einer möglichst reduzierten und standardisierten internen Variantenvielfalt zu realisieren (RENNER 2007).

Laut LINDEMANN (2009) können der Modularisierung weitere Potenziale zugeschrieben werden. Demnach kann aufgrund von Lernkurveneffekten die Produktqualität verbessert werden (GERSHENSON et al. 2003). Darüber hinaus wird das *outsourcing* von Modulen und Funktionen an Lieferanten vereinfacht. Ferner führt die Modularisierung zu einer Reduzierung des Entwicklungs- und Koordinationsaufwandes zwischen den Modullieferanten und dementsprechend auch zu einer Steigerung der Produktivität.

GÖPFERT (2009, S. 122, 168) bietet in seiner Arbeit eine übersichtliche und detaillierte Aufstellung der verschiedenen Chancen und Risiken der Modularisierung. Dabei konzentriert sich GÖPFERT (2009) nicht nur auf die Modularisierung von Produktstrukturen oder -architekturen, sondern beschreibt auch die Möglichkeiten und die dabei entstehenden Potenziale modularer Prozesse und Organisationen. Dabei sind Prozesse so zu gestalten, dass Interdependenzen zu anderen Prozessen minimiert werden und dass die definierten Prozessmodule weitgehend voneinander unabhängig operieren können. Nichtsdestotrotz erfordern modulare Prozesse auch modulare Produktarchitekturen (GÖPFERT 2009, S. 158, 160).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Modularisierung als Gestaltungsprinzip von Produktarchitekturen verwendet. Dabei stellt die Orientierung der Modularisierung einen weiteren wichtigen Aspekt zum Aufbau und Definition modularer Produktarchitekturen dar. Auf diese Weise kann die Modularisierung einer Produktarchitektur aus der organisatorischen Perspektive in der Entwicklung durchgeführt werden, so dass jedes Entwicklungsteam ein spezifisches Modul verantwortet (GÖPFERT 2009, S. 157). Außerdem können die

Modularisierung und die Definition von Modulen an einem Prozess gerichtet sein, wie zum Beispiel dem Montageprozess (DANIILIDIS & LINDEMANN 2012, RENNER 2007, S. 71) oder dem Entwicklungsprozess (DANIILIDIS et al. 2011b). Ebenfalls kann die Modularisierung auch an der aktuellen Lieferantensituation und den strategischen Produktionszielen des Unternehmens gerichtet sein (BEHNCKE et al. 2013b).

Eine weitere Stoßrichtung für die Modularisierung einer Produktarchitektur stellen die physischen und funktionalen Anhängigkeiten zwischen den Komponenten einer Produktarchitektur dar. Laut RENNER (2007, S. 71) spricht man dabei von einem Baukasten. Bei dieser Arbeit wird angenommen, dass die Modularisierung beziehungsweise eine aus der physischen und funktionalen Perspektive modulare Produktarchitektur die Grundvoraussetzung für die Definition eines Baukastens darstellt. Hierbei spricht man von einer Komponentenorientierung der Modularisierung.

2.3.3 Eingriffsmöglichkeiten auf die Produktarchitektur

In diesem Abschnitt sollen die sich aus den verschiedenen Arten von Produktarchitekturen und deren Potenziale ergebenden Möglichkeiten zur Verbesserung einer Produktarchitektur aufgelistet und zusammengefasst werden. Dabei wird nicht auf die Vollständigkeit dieser Maßnahmen gezielt, sondern vielmehr auf eine eindeutige Systematisierung und Beschreibung der verschiedenen Eingriffsmöglichkeiten. Abbildung 2-15 zeigt eine tabellarische Darstellung der Maßnahmen und der Eingriffsmöglichkeiten auf eine Produktarchitektur im Verhältnis zum Anwendungsbereich¹⁷ und zur Orientierung¹⁸ der Durchführung der Maßnahme.

Maßnahme	Anwendungsbereich		Orientierung
	Abstraktionsebene	Hierarchieebene	
Modularisierung	Anforderungsebene		funktional
	Funktionsebene	Baugruppenebene	physisch
	Bauebene		prozessorientiert organisationsorientiert
Standardisierung	Funktionsebene	Teile-/Elementarebene	funktional
	Wirkebene	Baugruppenebene	Eigenschaften
	Bauebene		
Anwendung von physischen Plattformen	Bauebene	Teileebene Baugruppenebene	
Baukastenentwicklung	Bauebene	Baugruppenebene	
Baureihenentwicklung	Bauebene	Baugruppenebene	Eigenschaften

Abbildung 2-15: Systematisierung von Maßnahmen anhand der Anwendungsbereiches und der Orientierung

¹⁷ Als Anwendungsbereich, wird der Bereich bezeichnet, wo die jeweilige Maßnahme durchgeführt wird. Der Anwendungsbereich besitzt dabei zwei Dimensionen: Die Abstraktionsdimension (vgl. MKM) sowie die Detaillierungsdimension (vgl. Zerlegungsgrad), die die Ebenen eines hierarchischen Strukturmodells darstellen.

¹⁸ Als Orientierung wird die Perspektive bzw. Stoßrichtung der jeweiligen Maßnahme bezeichnet.

Wie auch aus Abbildung 2-15 ersichtlich wird, stellen die Modularisierung und folglich modulare Produktarchitekturen ein breit anwendbares Gestaltungsprinzip dar. Modulare Strukturen können dabei auf verschiedenen Abstraktionsebenen definiert werden (s. auch vorherigen Abschnitt). Dabei zielt die Modularisierung auf die Erkennung und Definition geeigneter Module auf der Baugruppen- beziehungsweise auf der Subsystemebene. Diese Module können anhand verschiedener Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen oder Funktionen festgelegt werden. Auf diese Weise kann ein Modul von Bauteilen anhand der funktionalen Zusammenhänge zwischen den Bauteilen definiert werden. Darüber hinaus können auch weitere Perspektiven für die Modularisierung und die Architekturgestaltung berücksichtigt werden. Als solche, werden hier die physischen Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen, die Montagereihenfolge der Bauteile, die organisatorische Verantwortung für jedes Bauteil oder auch die Variantenvielfalt erwähnt (HELMER et al. 2007, DANIILIDIS et al. 2010, GÖPFERT 2009, EIGNER & ZAGEL 2007, EBEN et al. 2009). Welche Stoßrichtung die meisten Potenziale für eine Modularisierung mit sich bringen, hängt von der jeweiligen Situation ab.

Durch die Anwendung modularer Produktarchitekturen kann die Erkennung und Festlegung von Plattformen unterstützt werden. Zudem stellen modulare Produktarchitekturen die Voraussetzung für eine Baukastenstrategie dar.

Ähnlich wie die Modularisierung stellt auch die Standardisierung ein breit anwendbares Gestaltungsprinzip dar. Hierbei können Standards auf verschiedenen Ebenen definiert werden, um Skaleneffekte zu erzielen, die Qualität zu erhöhen und die interne Komplexität und Variantenvielfalt zu reduzieren (LINDEMANN & FREYER 2000, JESCHKE 1997). Folglich können auf der Funktionsebene einer Produktarchitektur Standardfunktionen definiert werden, die auch bei Neuentwicklungen für die Erfüllung bestimmter Anforderungen verwendet werden. Ferner kann auch die Realisierung dieser Funktionen auf der Wirk- sowie auf der Bauebene standardisiert werden, damit gleiche technische Lösungen und gleiche Bauteile¹⁹ für die Realisierung der gleichen Funktion entlang einer Produktarchitektur verwendet werden (vgl. Vermeidung von unnötigen Varianten). Ähnlich können Standards auch auf der nächsthöheren Hierarchieebene einer Struktur definiert werden und auf diese Weise Standardmodule beziehungsweise –baugruppen festgelegt werden (siehe Abbildung 2-16). Wie vorher beschrieben, legt eine geeignete Modularisierung der Produktarchitektur eine Voraussetzung dafür dar.

Im Gegensatz zur Standardisierung und den modularen Produktarchitekturen werden Plattformen hauptsächlich auf der physischen Ebene angewendet. Eine Plattform kann dabei sowohl ein Bauteil als auch eine Baugruppe sein, die eine standardisierte Grundfunktion entlang der externen Variantenvielfalt übernimmt (GRESHAKE 2011). Somit drückt die Anwendung von Plattformen eine Art der Standardisierung aus. Ähnlich werden Baukästen hauptsächlich komponentenorientiert entwickelt. Ein Baukasten kann aber sowohl Plattformen als auch Baureihen enthalten. Folglich kann ein Baukasten mehrere Größenstufungen eines Bausteins enthalten, die nach möglichst ähnlicher Fertigungsverfahren hergestellt werden (PAHL et al. 2006).

¹⁹ Vergleiche Gleich- und Wiederholteile

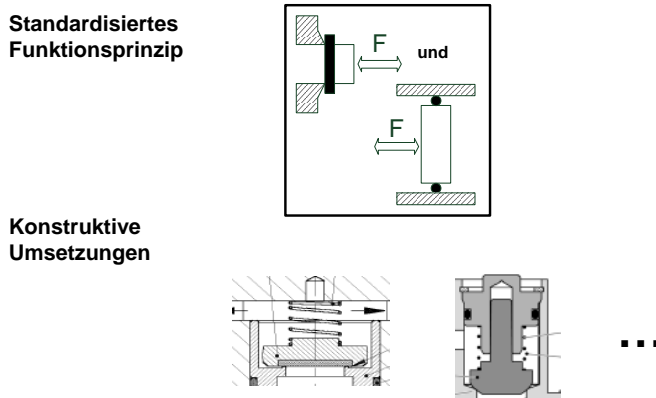


Abbildung 2-16: Konstruktive Lösungen für eine standardisierte Funktion (KIRNER et al. 2013)

Zusammenfassend gilt also: Die Bausteine eines Baukastens stellen Module dar, die aus der funktionalen und physischen Perspektive definiert wurden. Standards können auf verschiedenen Ebenen und Dimensionen angewendet werden und können in Form von Gleich- und Wiederholteilen Teile eines Baukastens oder einer Baureihe sein. Ähnlich können eine Baureihe wie auch Plattformen Bestandteile eines Baukastens sein. Damit wird ersichtlich, dass die Grenzen unter den verschiedenen Gestaltungsprinzipien fließend sind. Eine eindeutige Abgrenzung kann aufgrund der Überlappungen und der zahlreichen Schnittstellen, wenn überhaupt nur fallspezifisch oder teilweise, also hinsichtlich bestimmter Kriterien, ausgeführt werden. Nichtsdestotrotz weist die richtige Auswahl von Maßnahmen und Gestaltungsmöglichkeiten für die Optimierung einer Produktarchitektur eine Herausforderung auf und hebt die Bedeutung einer situationsgerechten Analyse der Produktarchitektur hervor.

Bei variantenreichen Produkten bietet sich eine weitere Möglichkeit, um in die Produktarchitektur einzugreifen und die Komplexität zu reduzieren und Kosten zu sparen. Diese Eingriffsmöglichkeit betrifft die Betrachtung und Analyse des Prozesses der Variantengenerierung (WILDEMANN 2005). Dabei soll einerseits die Variantengenerierung in der Dimension vom Groben ins Detail auf einer groben Ebene stattfinden, damit bei allen Produktvarianten möglichst die gleichen Teile (Bauteile, Elementarfunktionen) verwendet werden. Außerdem wird dadurch eine Erhöhung der Komplexität des Fertigungs- und Montageprozesses verhindert. Andererseits soll die Variantengenerierung im Fertigungs- und Montageprozess in einem möglichst späten und finalen Stadium erfolgen, so dass die Anfangsschritte der Montage für alle Produktvarianten gleichbleiben. Ähnlich wie bei WILDEMANN (2005) veranschaulicht Abbildung 2-17 die Optimierung einer Produktarchitektur aufgrund einer späten Variantengenerierung im Montageprozess bei gleichbleibender externer Variantenvielfalt.

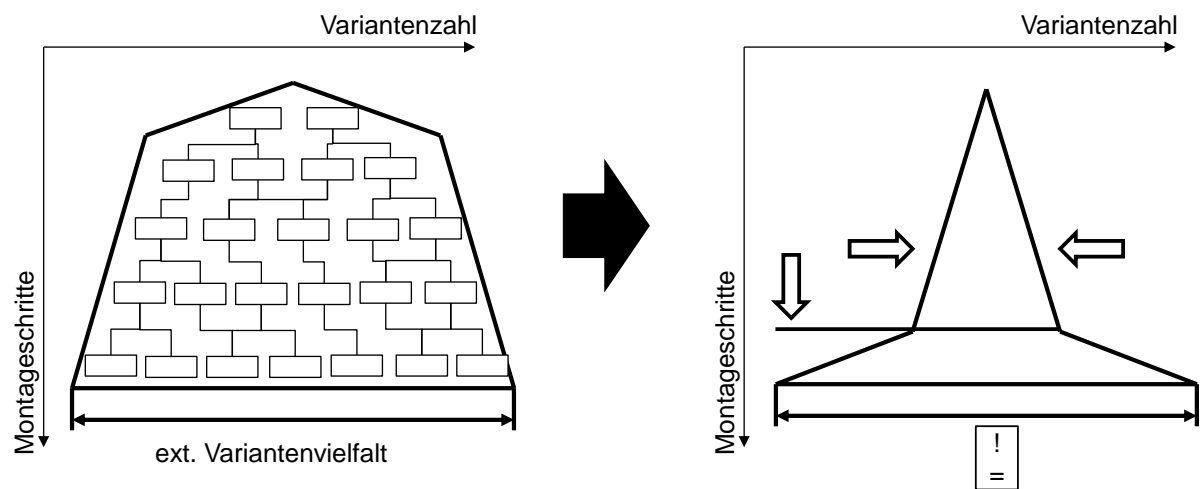


Abbildung 2-17: Optimierung der Produktarchitektur mit einer möglichst späten Variantengenerierung im Montageprozess

3. Stand der Forschung

In diesem Kapitel sollen relevante Ansätze, Vorgehensweisen und Methoden zur Analyse von Produktarchitekturen vorgestellt werden. Ziel dabei ist das im Kapitel 4 vorgestellte Vorgehen zur systematischen Analyse von Produktarchitekturen von den bereits existierenden Ansätzen eindeutig einzugrenzen. Bei den Methoden zur Analyse von Produktarchitekturen wird besonders auf die Methoden zur Modularisierung eingegangen, denn diese Methoden können auch für die Erkennung von Verbesserungspotential beziehungsweise Schwachstellen in einer Produktarchitektur herangezogen werden. Außerdem werden für diesen Zweck im letzten Abschnitt dieses Kapitels verschiedene Kennzahlen und Strukturmerkmale vorgestellt.

3.1 Relevante Ansätze in der Produktentwicklung

3.1.1 Komplexität beherrschen und Transparenz schaffen

Die Vorgehensweise des Systems Engineering für die Systementwicklung nach HABERFELLNER (2002) lässt sich durch drei Aspekte beziehungsweise durch drei unterschiedliche Dimensionen charakterisieren. Diese Dimensionen, deren Betrachtung für eine Systementwicklung zweckmäßig ist, sind

- vom Groben zum Detail
- die Betrachtung der Lebensphasen eines Systems
- die Anwendung einer formalen Vorgehensweise für die Lösung von Problemen, egal welcher Art und in welcher Lebensphase eines Systems sie auftreten

Die Vorteile der schrittweise Betrachtung und Analyse eines Systems, Produktes oder sogar eines Problems vom Groben zum Detail wurden bereits im Kapitel 2.1 im Kontext der Produktarchitekturen näher erläutert. HABERFELLNER (2002) benutzt das Vorgehen vom Groben zum Detail einerseits, um den Betrachtungsraum eines Problems oder die Entwicklung eines Systems schrittweise einzuengen, andererseits, um Varianten des Systems ebenfalls schrittweise zu generieren und auszuschneiden.

Außerdem zieht HABERFELLNER (2002) die Lebensphasen eines Systems in Betracht, was beispielsweise für die Neuentwicklung eines Systems oder Produktes von großer Bedeutung ist. Die Anwendung eines formalen Problemlösezyklus für alle auftretenden Probleme und Aufgaben rundet die Vorgehensweise ab. Der dabei vorgestellte Problemlösezyklus ist in vielerlei Hinsicht ähnlich mit dem Münchener Vorgehensmodell (MVM), das im Kapitel 2.1 vorgestellt wurde. Wie auch beim MVM widmet sich die erste Phase des Problemlösezyklus der Klärung des Zieles und der konkreten Situationsanalyse.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das systematische Vorgehen vom Groben zum Detail für die Analyse einer Produktarchitektur angewendet und auf diese Weise wird die Produktarchitektur als System in ihre Teilsysteme und elementar Bausteine zerlegt. Außerdem kann dieses

Vorgehen auch zur schrittweisen Durchführung einer Situationsanalyse herangezogen werden, was aber nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt.

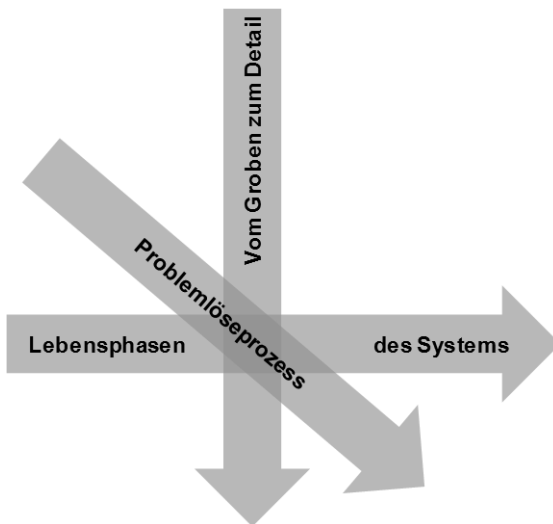


Abbildung 3-1: Zusammenfassende Darstellung der Dimensionen des Vorgehens des Systems Engineering (HABERFELLNER 2002)

3.1.2 Strukturelles Komplexitätsmanagement

Komplexitätsmanagement wird oft als Synonym für Variantenmanagement verstanden. Das strukturelle Komplexitätsmanagement geht darüber hinaus, da nicht nur die produktspezifische Komplexität, sondern weitere Aspekte der Produktentwicklung und der Analyse und Synthese von Produkten und Systemen betrachtet werden (LINDEMANN et al. 2009). Um Transparenz in einem System zu schaffen und ein besseres Verständnis über die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen Systemelementen zu erhalten, wird die Struktur des Systems mittels eines qualitativen Modells dargestellt. Dabei wird das System vom Groben ins Detail in Teilsystemen und Systemelementen zerlegt, deren Abhängigkeiten bestimmt und das Input und Output des Systems ermittelt (MAURER 2007). Um die Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen zu bestimmen, werden verschiedene Relationsarten verwendet, je nach dem welche Relationsart für die jeweilige Situation zielführend ist. So können beispielsweise geometrische, funktionale, montagetechnische oder umsatzorientierte Abhängigkeiten bei technischen Komponenten berücksichtigt (LINDEMANN 2009).

Die Vorgehensweise des strukturellen Komplexitätsmanagements beinhaltet fünf Schritte zur Analyse und Beherrschung komplexer Systeme (siehe auch Abbildung 3-2). Nach der Klärung der Problemstellung und Zielsetzung der Analyse stellt die Systemdefinition zur Beschreibung der relevanten Systeminhalte den ersten Schritt des Vorgehens dar. Außer der Festlegung der Betrachtungsdomänen, die für die nachfolgende Analyse relevant sind, werden in diesem Schritt auch die relevanten Abhängigkeiten und Relationsarten zwischen den

Betrachtungsdomänen definiert und mittels einer *Multiple-Domain Matrix* (MDM) transparent modelliert (MAURER & LINDEMANN 2007, EICHINGER et al. 2006).

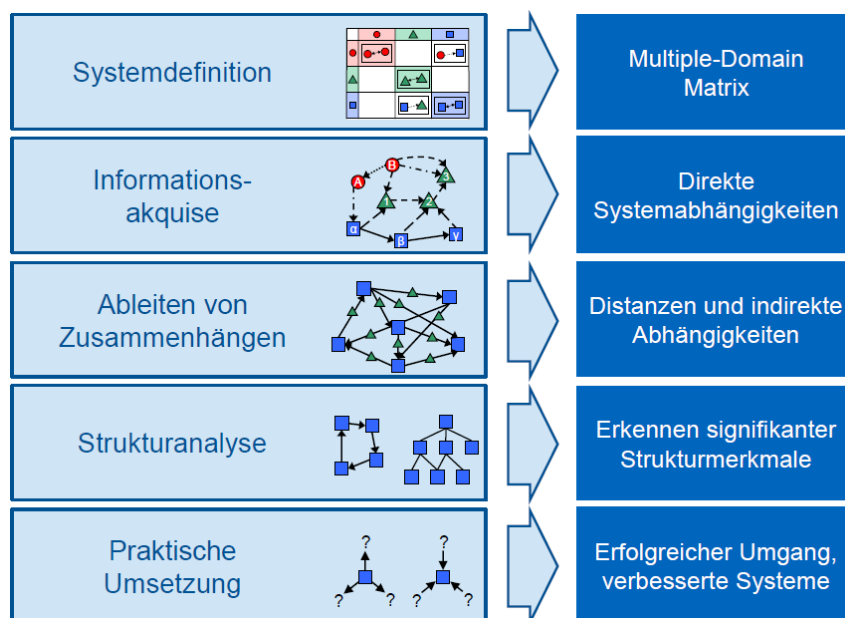


Abbildung 3-2: Das schrittweise Vorgehen des strukturellen Komplexitätsmanagements (LINDEMANN et al. 2009)

Die Bausteine dieser Matrix sind die *Design Structure Matrix* (DSM) oder Einflussmatrix, die Abhängigkeiten innerhalb einer Domäne enthält, und die *Domain Mapping Matrix* (DMM), die Relationen zwischen zwei verschiedenen Domänen beinhaltet (MAURER et al. 2006, DANILOVIC & BROWNING 2004). Ein Beispiel für eine MDM und ihre Baustuktur wird in Abbildung 3-3 gezeigt.

Die MDM dient dazu, den Umfang der Betrachtung anzugeben. Sie ist die Basis für die systematische Identifikation der erforderlichen Informationsquellen und bildet die Grundlage für die nachfolgende Informationsakquise und alle weiteren Schritte des Ansatzes. Außerdem werden bei der Systemdefinition und mit Hilfe der MDM die indirekten Abhängigkeiten zwischen Systemelementen bestimmt, die aus den erfassten direkten Abhängigkeiten abgeleitet werden. Für die meisten Analyse- und Optimierungsaufgaben ist eine MDM, die Informationen über mehrere Domänen stimmig aufschlüsselt, essentiell und stellt unter anderem auch eine Art *Road Map* für das jeweilige Vorhaben dar (DANILOVIC & BROWNING 2007).

Basierend auf der Systemdefinition müssen Informationen über die direkten Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen gesammelt werden. Mit einer direkten Abhängigkeit ist eine unmittelbare Wirkung von einem Systemelement auf ein anderes gemeint. Wie bereits erwähnt, können Abhängigkeiten innerhalb einer Domäne, oder aber auch zwischen zwei verschiedenen Domänen existieren. Je nach Fall und Verfügbarkeit können die verschiedenen Abhängigkeiten aus vorhandenen Datenbanken, Modellierungen oder durch i.d.R. zeitaufwendigen Interviews und Workshops gewonnen werden. Die größte Herausforderung dabei ist, eine hohe Qualität der resultierenden Daten zu gewährleisten (MAURER 2007, KISSEL 2014). Ein wesentlicher

Fehler, der bei der Akquise von Informationen über die Abhängigkeiten zwischen Systemelementen auftreten kann, ist die Wahrnehmung von indirekten Abhängigkeiten als direkte Abhängigkeiten. Solche Fehler führen zu einer inkorrekten Struktur und dementsprechend auch zu falschen Analyseergebnisse. Aufgrund dessen ist es von großer Bedeutung bei der Systemdefinition die relevanten Abhängigkeiten genau zu definieren und bei der Informationsakquise die gesammelten Informationen ständig zu hinterfragen (MAURER 2007).

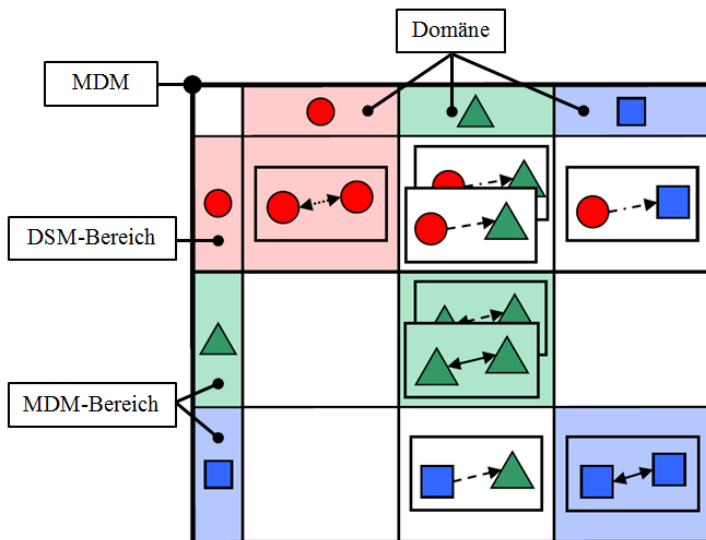


Abbildung 3-3: Multiple Domain Matrix (MAURER & LINDEMANN 2007)

Nach dem Abschluss der Informationsakquise und Modellierung der erfassten Systemstruktur mittels einer *Multiple Domain Matrix* können in diesem Schritt relevante, indirekte Abhängigkeiten aus den erfassten Informationen über direkte Abhängigkeiten abgeleitet werden. Abbildung 3-4 zeigt ein solches Beispiel, wo aus zwei direkten Abhängigkeiten eine indirekte Abhängigkeit abgeleitet werden kann.

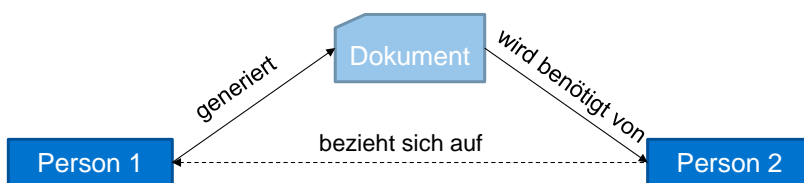


Abbildung 3-4: Beispiel einer indirekten Abhängigkeit (MAURER 2007)

Die indirekten Abhängigkeiten können durch verschiedene Matrixmultiplikationen zwischen DSMs und DMMs gewonnen werden. MAURER (2007) stellt in seiner Arbeit sechs mögliche Matrixmultiplikationen für die Aufstellung von DSMs und DMMs vor. Anhand der bei der

Informationsakquise gewonnenen Daten und der noch notwendigen indirekten Abhängigkeiten soll die geeignete Matrixmultiplikation herangezogen werden.

Das in der Abbildung 3-4 vorgestellte Beispiel zeigt die Ableitung einer gerichteten, indirekten Abhängigkeit zwischen zwei „Personen“, also zwischen zwei Systemelementen der gleichen Betrachtungsdomäne. Diese indirekte Abhängigkeit wird durch die Multiplikation der zwei DMMs, die die beiden direkten Abhängigkeiten zwischen „Personen“ und „Dokumenten“ beinhalten, und wird durch folgende Formel 3-1 gegeben:

$$DSM_{Personen} = DMM_{Personen-Dokum} * DMM_{Dokum-Personen}$$

Formel 3-1

Bei diesem Beispiel werden die Abhängigkeiten beider DMMs durch die Informationsakquisition erfasst. Wichtig dabei anzumerken ist, dass die Abhängigkeiten zwischen „Personen“ und „Dokumenten“ in den zwei DMMs nicht die gleichen sind. So wird in der ersten DMM erfasst, welche „Dokumente“ von welchen „Personen“ „generiert“ werden, und die zweite DMM beinhaltet die Information, welche „Dokumente“ von welchen „Personen“ „benötigt werden“. Infolge dessen sind die durch die Formel 3-1 ermittelten Abhängigkeiten zwischen „Personen“ gerichtet in dem Sinne, dass „Person 2“ sich auf „Person 1“ bezieht.

Eine einfachere Methode, um eine DSM mit indirekten Abhängigkeiten abzuleiten, besteht durch den Einsatz nur einer DMM. In unserem Beispiel mit den Domänen „Personen“ und „Dokumente“ wäre das der Fall, wenn während der Informationsakquise nur eine der beiden vorher beschriebenen DMMs direkt erfasst wäre. Auf diese Art wäre beispielsweise nur die Information akquiriert, welche „Personen“ welche „Dokumente“ „generieren“. Diese DMM kann dann ohne Bedarf an zusätzlichen Informationen transponiert werden. Durch folgende Multiplikation (Formel 3-2) wird die DSM mit den indirekten Abhängigkeiten zwischen den „Personen“ berechnet:

$$DSM_{Personen} = DMM_{Personen-Dokum} * DMM^T_{Personen-Dokum}$$

Formel 3-2

Die resultierende DSM gibt allerdings keinen Aufschluss darüber in was für eine Beziehung zwei voneinander abhängige „Personen“ stehen. Der Grund dafür ist, dass die Abhängigkeiten zwischen den „Personen“ nicht wie beim vorherigen Fall gerichtet sind. Außerdem ist die durch die Formel 3-2 berechnete DSM eine symmetrische Matrix und die meisten Analysealgorithmen können nicht angewendet werden beziehungsweise die weitere Analyse der Struktur der DSM wurde zu keinem besonderen Erkenntnis führen (MAURER 2007).

Nach der Fertigstellung des Systemmodells durch die Informationsakquise und Ableitung indirekter Zusammenhänge folgt die Strukturanalyse mit dem Ziel wichtige und für die Aufgabe relevante Strukturmerkmale zu identifizieren. Solche können beispielsweise

Kreisschlüsse, die Aktivität oder Kritikalität von Elementen, Brückenelemente oder Cluster sein. Dies wird vor allem durch die Anwendung verschiedener Algorithmen der Graphentheorie ermöglicht. Damit ist es anhand geeigneter Methoden und i.d.R. auch computerunterstützter Programme beispielsweise möglich, Systemelemente zu clustern (siehe auch Kapitel 3.2.1) und Rückkopplungs- oder Iterationsschleifen aufzufinden (KREIMEYER 2009, LINDEMANN et al. 2009, MAURER 2007). Die Folge daraus ist eine Reduzierung der Systemunsicherheiten, die Entdeckung von Schwachstellen in der Struktur sowie die Ermöglichung von Strukturoptimierungsmaßnahmen. Außerdem bietet die Strukturanalyse die Möglichkeit für ein verbessertes Strukturmanagement und liefert die Grundlage für die nachfolgenden praktischen und konstruktiven Umsetzungen.

Der letzte Schritt des Vorgehens des strukturellen Komplexitätsmanagements stellt die praktische Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen dar und nutzt die Ergebnisse aus der Strukturanalyse, um Lösungen für eine verbesserte Struktur zu bieten und den Transfer des Strukturwissens in die konkrete Problemlösung zu ermöglichen. Beispielsweise die Auswirkungen von Änderungen in die Systemstruktur können rückverfolgt und somit der Einfluss der Änderung am Gesamtsystem eingeschätzt werden. Auch Hindernisse einer Strukturoptimierung innerhalb des Gesamtsystems werden in diesem Schritt identifiziert. Demzufolge wird die Voraussetzung für ein besseres Systemverständnis erreicht. Dies kann beispielsweise in einem Strukturhandbuch zusammengefasst werden.

3.1.3 Variantenmanagement in der Produktentwicklung

Im Kapitel 1.1.3 wurden kurz die Ursachen und Folgen der Variantenvielfalt für die Produktentwicklung erläutert. WILDEMANN (2005) gibt als Hauptfolge der erhöhten Variantenvielfalt auf dem Markt und innerhalb eines Unternehmens eine erhöhte Komplexität und die damit resultierenden Komplexitätskosten²⁰ an. Damit ein nachhaltiger Erfolg des Variantenmanagements gewährleistet werden kann, muss eine gesamtheitliche Beachtung aller Aspekte der Variantenvielfalt und Komplexität ermöglicht werden (WILDEMANN 2005). Da die Variantenvielfalt nicht nur auf der Produktebene sondern auch auf der Prozessebene²¹ auftritt, sind effektive Maßnahmen auf beiden Ebenen durchzuführen (siehe auch Abbildung 3-5). Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Komplexität zu reduzieren, zu beherrschen und zu vermeiden (WILDEMANN 2005).

Laut SCHUH (2005) (S. 37) stellen die Entwicklung, Gestaltung und Strukturierung des Produktsortiments im Unternehmen die Aufgabe des Variantenmanagements dar. Wobei das Ziel des Variantenmanagements das Erreichen einer optimalen Variantenvielfalt und Komplexität ist (RENNER 2007, WILDEMANN 2005). Da erst durch eine hohe Variantenvielfalt die Erschließung weiterer Marktanteile und die Erfüllung individueller Kundenwünsche

²⁰ vgl. HANSEN et al. 2012

²¹ Dabei sind sowohl der Entwicklungsprozess als auch die Fertigungs- und Montageprozesse betroffen. Die Variantenvielfalt beeinflusst auch verschiedene Verwaltungsprozesse, die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden.

möglich ist, ist es die Aufgabe des Variantenmanagements das Optimum zwischen Nutzen und Kosten der Variantenvielfalt zu identifizieren und den Markt nur mit den nötigen Varianten zu bedienen (EHRENSPIEL et al. 2007a, WILDEMANN 2005). Das bedeutet, dass der Produkt- und Programmnutzen mit dem dafür im Unternehmen geleisteten Aufwand übereinstimmt. Um das zu erreichen, muss (siehe auch Abbildung 3-5) eine Variantenanalyse durchgeführt werden.

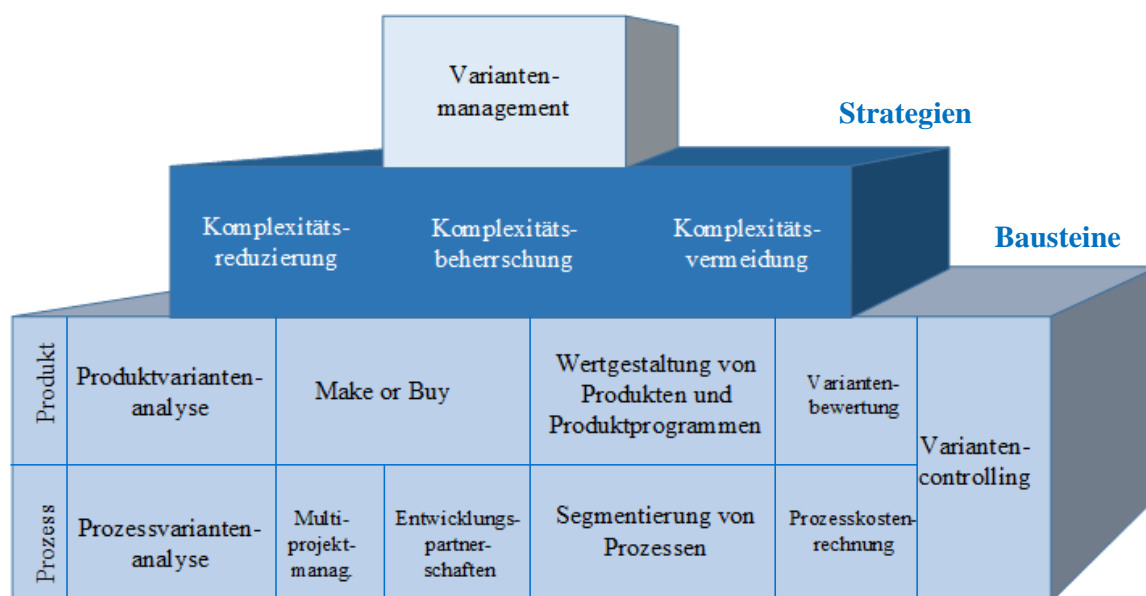


Abbildung 3-5: Aufbau des Variantenmanagements nach WILDEMANN (2005)

Da die Analyse und Bewertung des Produkt- und Programmnutzens und des unternehmensbezogenen Aufwands nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, wird an diesem Punkt an die Literatur verwiesen. Ziel dieser Arbeit ist (siehe auch Kapitel 1.3) die interne Variantenvielfalt und Komplexität mittels geeigneter Methoden zu analysieren und zu optimieren, so dass die externe Variantenvielfalt nicht beeinflusst wird. Folglich werden in diesem Abschnitt die Strategien der Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung näher erläutert, die ohne Berücksichtigung des Marktaspektes auf die Produkt- und Prozessebene Anwendung finden. Nach dem Aufbau des Variantenmanagements nach WILDEMANN (2005) (siehe Abbildung 3-5) handelt es sich dabei um den Baustein der Wertgestaltung von Produkten und Produktprogrammen.

In der Praxis haben sich zwei Ansätze für die Variantenreduzierung und -beherrschung bei bestehenden Produktarchitekturen und für die Variantenvermeidung bei Neuentwicklungen bewährt. Einerseits die Variantenverlagerung längs des Durchlaufes des Herstellungs- und Wertschöpfungsprozesses (siehe auch Kapitel 2.3.3) und andererseits die Kommunalität auf der Teile-, Technologie- und Prozessebene (WILDEMANN 2005, LINDEMANN & BAUMBERGER 2006, FRANKE et al. 2002).

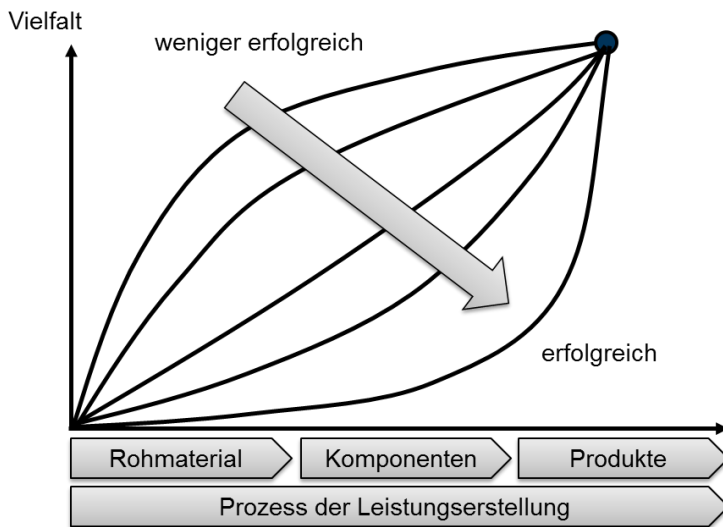


Abbildung 3-6: Veranschaulichung der Variantengenerierung (WILDEMANN 2005)

Mit einer Verlagerung der Variantengenerierung möglichst ans Ende des Herstellungsprozesses können die interne Variantenvielfalt und die damit verbundenen Komplexitätskosten reduziert werden (LINDEMANN et al. 2006, BAUMBERGER et al. 2007).

FRANKE et al. (2002) beschreiben außerdem, dass die Variantenvielfalt durch Konfiguration ähnlicher oder gleicher Teile statt durch Konstruktion zu erreichen sein muss. Durch die Kommunalität ist es dann möglich variantenreiche Produkte ähnlich wie bei einer Massenfertigung zu erzeugen (PILLER & WARINGER 1999). Dabei ist das Ziel der Kommunalität, dass Synergieeffekte bei der Erstellung variantenreicher Produkte entstehen. Außer der Standardisierung auf der Teileebene und der damit verbundenen Reduzierung der internen Variantenvielfalt, bringt die Kommunalität weitere Vorteile mit sich. Dazu zählen beispielsweise der Einsatz gleicher oder ähnlicher Fertigungstechnologien, der Einsatz gleicher Werkzeuge und Produktionsmittel und die Standardisierung der Montage (KIPP 2012). Außerdem wird dadurch die Komplexität des Produktionsprozesses reduziert und mögliche negative Auswirkungen dieser Komplexität auf die Produktion können minimiert werden (JIAO & TSENG 1999, EHRENSPIEL 2009).

Ein Instrument, das die Auswirkung dieser beiden Ansätze angibt, ist der Variantenbaum (SCHUH 1988) (Abbildung 3-7) (siehe auch Kapitel 2.3.3). Dabei ordnet man die Anbauteile entsprechend der Montagereihenfolge und gibt zu jedem Montageschritt die dafür möglichen Varianten an. Außerdem kann der Variantenbaum aus der Kundensicht aufgestellt werden und so einen Aufschluss über die Zahl der möglichen und nachgefragten Produktvarianten angeben (EHRENSPIEL 2009). Mit einer Quantifizierung und Visualisierung der Nachfrage beziehungsweise des Umsatzes pro Produktvariante wird eine Fokussierung des Produktprogramms ermöglicht (WILDEMANN 2005).

Ferner eignet sich der Variantenbaum, um eine Gegenüberstellung des eigenen Produktprogramms und der Konkurrenz durchzuführen. Ähnlicherweise kann man auch dem

Variantenbaum des Ist-Zustands einen Soll-Variantenbaum gegenüberstellen (EHRENSPIEL 2009).

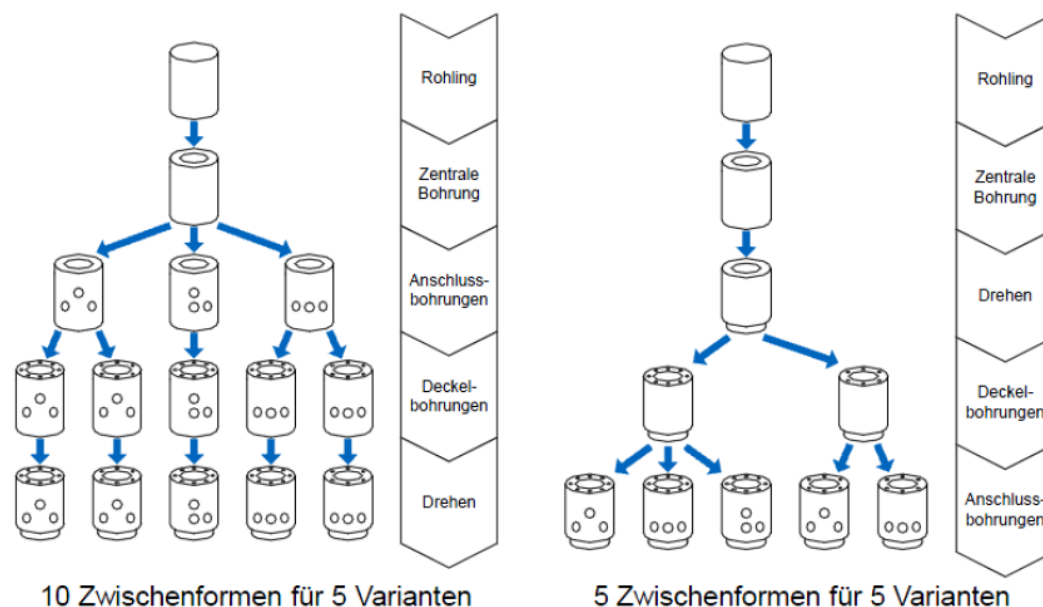


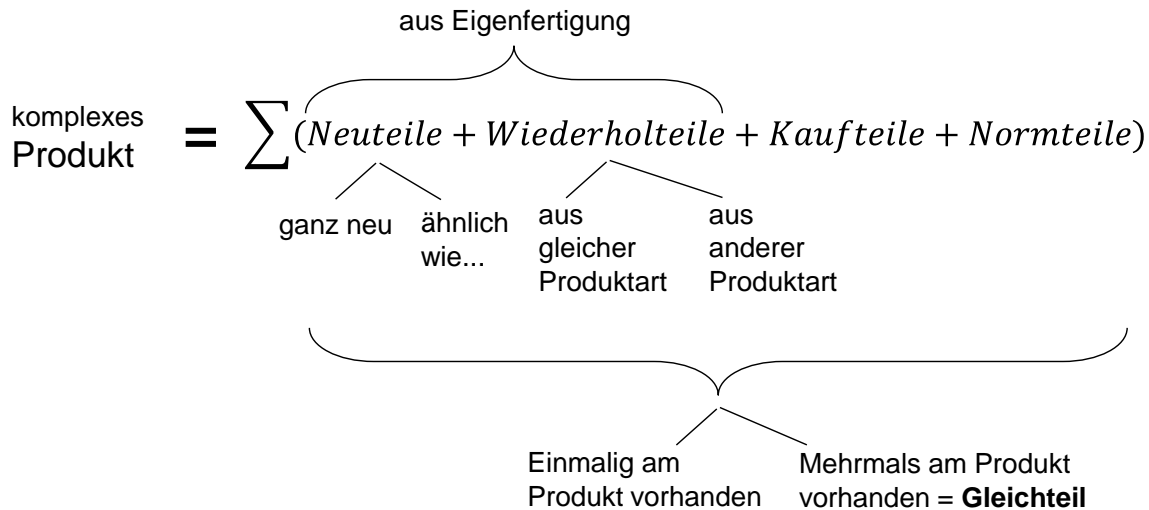
Abbildung 3-7: Veranschaulichung der Verlagerung der Variantengenerierung durch den Variantenbaum (NADLER 2012)

Eine weitere Methode, um die Kommunalität innerhalb einer Produktarchitektur zu beurteilen, stellt der Normungsgrad dar. Durch den Normungsgrad wird der Umfang der Produktnorm angegeben, also in welchem Maße ist die Produktarchitektur auf der Teile- und Baugruppenebene standardisiert. Der Normungsgrad wird mit der Unterstützung folgender Gleichung (Formel 3-3) gegeben. Je höher die Kommunalität und die Einsetzung von Gleich-, Wiederhol- und Normteilen in die Produktarchitektur sind, umso weniger Neuteile sind notwendig (EHRENSPIEL 2009). Der Normungsgrad gibt also den Prozentsatz aus der Summe von Wiederhol-, Gleich-, Kauf- und Normteilen im Verhältnis zur Gesamtsumme der unterschiedlichen Teile an.

Durch den Normungsgrad wird ersichtlich, dass auch eine gezielte Erhöhung von Kaufteilen eine Erhöhung des Normungsgrades und der Kommunalität bewirkt. Dennoch ist die Entscheidung zwischen „Make or Buy“ kein einfaches Unterfangen und muss deswegen methodisch angegangen werden. WILDEMAN (2005) stellt in seiner Arbeit eine systematische Vorgehensweise, um diesen Entscheidungsprozess zu unterstützen. Zudem können bei einer Kommunalitätsanalyse weitere Aspekte mit einbezogen werden, wie zum Beispiel die Fertigungs- und Montageprozesse, Werkstoffe oder Schnittstellen (THEVENOT & SIMPSON 2007).

Aus der Sicht der Fertigung und Montage ist es dann sinnvoll Neuteile möglichst variantengerecht zu konstruieren. Dies bedeutet möglichst formähnliche und bearbeitungsähnliche Teile zu gestalten, damit die gleichen Fertigungstechnologien und

Werkzeuge verwendet werden können und damit auch Rüstzeiten verringert werden können (EHRENSPIEL 2009).



Formel 3-3: Teilearten einer Produktarchitektur (EHRENSPIEL 2009)

In den vorherigen Abschnitten wurden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt um die zwei Ansätze zur Variantenreduzierung und -vermeidung zu ermöglichen. Dabei hat sich in der Praxis die Bildung von Baureihen, Baukästen und die Verwendung von Plattformen mittels modularer Produktarchitekturen als am wirkungsvollsten bewiesen (EHRENSPIEL 2009, PILLER & WARINGER 1999). Wie im Kapitel 2.3.2 beschrieben wurde, können die positiven Effekte durch Baureihen und Baukästen dann maximiert, wenn sie auch die in diesem Kapitel beschriebenen Maßnahmen und Ansätzen beinhalten und unterstützen.

Wie schon gezeigt, stellt die Produktarchitektur einen entscheidenden und zentralen Faktor in der Produktentwicklung, um Komplexität zu reduzieren, zu beherrschen und die unnötige Variantenvielfalt zu vermeiden. Im nächsten Kapitel werden Analysemethoden vorgestellt, die die Modularisierung von Produktarchitekturen unterstützen und die Definition von Standards ermöglichen.

3.2 Analysemethoden von Produktarchitekturen

In den vorherigen Abschnitten (siehe Kap. 2.3.2, 2.3.3, 3.1) wurden die Bedeutung und die Vorteile der Modularität in einer Produktarchitektur näher untersucht und vorgestellt. Außerdem kann ein wirkungsvolles, internes Variantenmanagement durch eine geeignete Produktmodularität erreicht werden. Folgendermaßen stellt die Modularisierung eine zentrale Aufgabe der Analyse und Optimierung einer Produktarchitektur dar und somit wird es in diesem Kapitel konkreter auf die Methoden und Ansätze zur Erreichung einer modularen Produktarchitektur eingegangen.

3.2.1 Modularisierungsmethoden und -ansätze

In der Literatur kann eine große Anzahl von verschiedenen Methoden und Ansätzen gefunden werden, um Produktarchitekturen zu analysieren und bezüglich ihrer Modularität zu beurteilen, sowie Standards auf unterschiedlichen Abstraktions- und Detaillierungsebenen zu definieren (DANIILIDIS et al. 2011a). In diesem Abschnitt werden vier gängigen Ansätze zur Analyse und Modularisierung von Produktarchitekturen, die sich in der Produktentwicklung bewährt haben, vorgestellt und näher erläutert. Darüber hinaus wird auch auf bestimmte Weiterentwicklungen dieser Ansätze verwiesen, die für diese Arbeit relevant sind.

Modular Function Deployment

Die von ERIXON (1998) entwickelte Methode “Modular Function Deployment” stellt eine Methode zur Modularisierung von Produkten unter Berücksichtigung von organisationalen Gegebenheiten eines Unternehmens und dessen Prozesse dar (ERIXON 1998). Dabei wird eine Verknüpfung zwischen den Modulen und den jeweils dazugehörigen Entwicklungsabteilungen hergestellt. Es handelt sich daher um eine Modularisierungsmethode, die abstrakte und strategische Parameter für die Entwicklung von modularen Produktstrukturen berücksichtigt. Um dies zu ermöglichen basiert die Methode auf Funktionsstrukturen, berücksichtigt aber weitere Modularitätstreiber als nur die Funktionalität des Produktes. Die Methode stützt sich auf eine *Module Indication Matrix* (MIM). Diese dient als Grundlage zur Gegenüberstellung von den technischen Lösungen mit den Kriterien der Modulbildung (NADLER 2012). Die Methode zielt auf die Aussage, ob, und wenn ja, welche Teilelemente als Module ausgeführt werden sollen.

Die Methode durchläuft fünf Schritte, die wie folgt zusammengefasst und beschrieben werden können:

- Ermittlung der Kundenwünsche an das Produkt und Festlegung der Produktspezifikation
- Anforderungen und technische Lösungen zur Erfüllung der Funktionen herausarbeiten – Erstellung der Produktstruktur
- Festlegung von Modulen mittels der *Module Indication Matrix*
- Gesamtkonzept erstellen und bewerten
- Module optimieren durch erneutes Anwenden der *Module Indication Matrix*

Entscheidender Schritt für die Identifikation von Modulen ist der dritte Schritt des Vorgehens. Dabei wird die sogenannte *Module Identification Matrix* aufgestellt. Mittels dieser Matrix wird anschließend der Einfluss eines Bauteils auf zwölf *Modularitätstreiber* gewichtet und bewertet (ERICSSON & ERIXON 1999). Auf diese Weise wird es ermöglicht, Module aus der Perspektive der Varianten, der Montage, der Lebensdauer und des Produktentstehungsprozesses zu identifizieren. Um diesen Vorgang zu unterstützen, stellt ERIXON (1998) einen Fragebogen in seiner Arbeit vor. Entscheidend bei der Festlegung von Modulen ist die Anzahl der zu definierenden Module. Hierfür wird ein Richtwert für die Anzahl der Module festgelegt, der sich aus der Wurzel der in einer Produktvariante durchschnittlich enthaltenen Bauteile ergibt. Im Anschluss an die Moduldefinition werden im vierten Schritt die Schnittstellen zwischen den Modulen analysiert und anhand dessen ein Gesamtkonzept erarbeitet.

Der größte Nachteil der Methode zeigt sich in der geringen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Methode dar (HÖLTTÄ-OTTO & SALONEN 2003). Zu den Vorteilen der Methode zählen die breiten unternehmensspezifischen Perspektiven aus denen ein Produkt modularisiert werden kann. Darüber hinaus ist möglich den kompletten Lebenszyklus des Produktes für die Moduldefinition zu berücksichtigen (DANIILIDIS et al. 2011a).

Function Heuristics

Die Funktionsheuristiken zur Identifikation von Modulen nach STONE et al. (1998, 2000) stellen eine weitere funktionsbasierte Modularisierungsmethode dar. Im Gegensatz zu *Modular Function Deployment* wird bei dieser Methode eine umsatzorientierte Funktionsmodellierung²² angewendet. Auf diese Weise stellt der erste Schritt der Methode die Aufstellung eines Black-Box Modells des betrachteten Produktes, gefolgt von der Erarbeitung des umsatzorientierten Funktionsmodells dar. Auf Basis dieses Funktionsmodells werden im Anschluss die Funktionsheuristiken angewendet, um mögliche Module zu identifizieren (STONE et al. 1998, STONE et al. 2000). Um dieses Vorgehen näher zu erläutern und die Möglichkeiten der Methode zu untersuchen, wurde im Rahmen dieser Arbeit diese Methode auf ein Druckluftventil angewendet. Das von Knorr-Bremse SfS GmbH hergestellte Druckluftventil ist ein Kolbenventil, das der Be- und Entlüftung definierter Volumen in Druckluftanlagen dient. Abbildung 3-8 zeigt den schematischen Aufbau des pneumatisch gesteuerten Kolbenventils mit separatem Steuerluftanschluss. Das Gerät besteht im Wesentlichen aus:

- dem Gehäuse (a)
- dem Ventilteller (b)
- dem Schaltkolben (c)
- und den Druckfedern (d und e)

Der Ventilteller (b) und der Schaltkolben (c) werden durch die Druckkraft der Feder (d und e) in der dargestellten Position gehalten. Außerdem ist das Gerät als Flanschgerät ausgeführt und alle Druckluftanschlüsse an der Flanschseite des Gehäuses (a) werden mit O-Ringen (f) abgedichtet.

Um das Black-Box Modell und das Funktionsmodell des Ventils aufzustellen ist es erforderlich die Funktionsweise des Kolbenventils zu betrachten. Je nach Steuerdruck kann das Ventil zwei Stellungen annehmen. Diese sind folgende:

1. Steuerdruck liegt nicht an: Am Steuerluftanschluss A4 liegt kein Steuerdruck an. Ventilsitz V1 ist geschlossen und Ventilsitz V2 offen. Im Gerät ist der Durchgang von Druckluftanschluss A1 zum Verbraucheranschluss A3 hergestellt. Die Verbindung von Druckluftanschluss A2 zum Verbraucheranschluss A3 ist gesperrt.
2. Steuerdruck liegt an: Am Steuerluftanschluss A4 liegt Steuerdruck an. Der Schaltkolben (c) macht eine Hubbewegung, schließt bei Anliegen am Ventilteller (b) den Ventilsitz

²² Bei der umsatzorientierten Funktionsmodellierung werden die Gesamtfunktion und die Ein- und Ausgänge von Materie, Energie und Information schrittweise in Teilfunktionen aufgegliedert. Die Teilfunktionen werden durch den Fluss von Materie, Energie und Information in Funktionsketten miteinander verbunden (PAHL et al. 2006).

V2 und öffnet in weiterer Folge Ventilsitz V1. Im Gerät ist der Durchgang von Druckluftanschluss A2 zum Verbraucheranschluss A3 hergestellt. Die Verbindung von Druckluftanschluss A1 zum Verbraucheranschluss A3 ist gesperrt.

Bei Entlüftung des am Steuerluftanschluss A4 anliegenden Steuerdrucks gehen der Schaltkolben (c) und der Ventilteller (b) unter Wirkung der Druckkraft der Druckfedern (d und e) wieder in die Ausgangsstellung zurück (KNORR-BREMSE 2008).

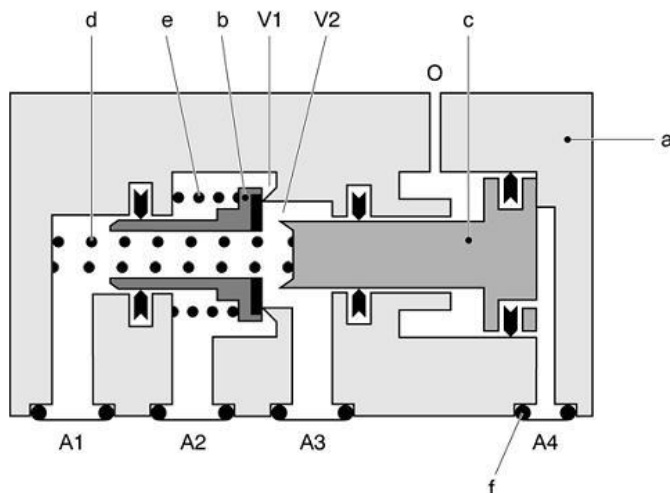


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung des Aufbaus des Kolbenventils von Knorr Bremse (Quelle: Knorr Bremse SfS GmbH)

Nachdem der Aufbau und die Funktionsweise des Ventils erläutert worden sind, wird im ersten Schritt des Vorgehens der Methode ein Black-Box Modell der Gesamt- bzw. Hauptfunktion des Kolbenventils mit allen Ein- und Ausgängen von Materie, Energie und Information aufgestellt (siehe Abbildung 3-9). Wichtig anzumerken ist, dass beim Kolbenventil die Information zur Steuerstellung ebenfalls in Form von Druckluft bereitgestellt wird.

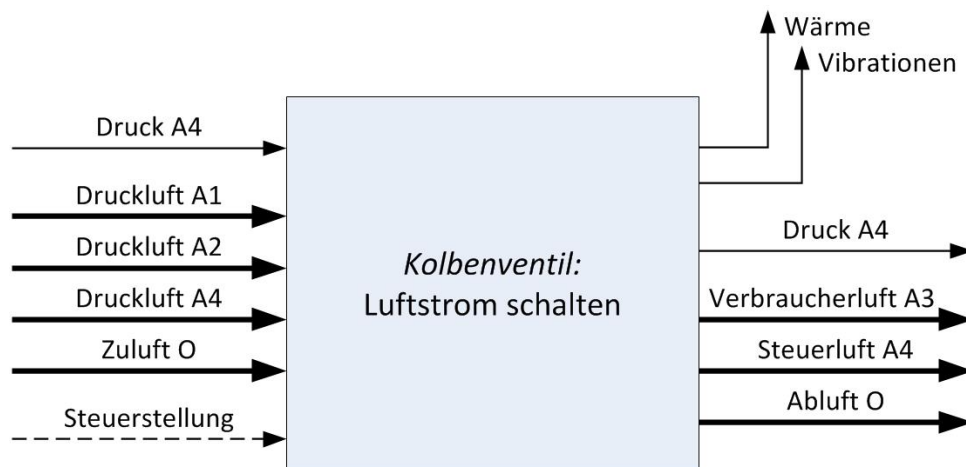


Abbildung 3-9: Black-Box Modell der Gesamtfunktion des Kolbenventils (ENBLIN 2011)

Im nachfolgenden Schritt wird die Gesamtfunktion des Kolbenventils in Teilfunktionen aufgegliedert und das umsatzorientierte Funktionsmodell des Ventils aufgestellt. Dabei werden die einzelnen Eingänge des Black-Box Modells näher untersucht und der Fluss dieser Eingänge durch das Produkt verfolgt bis sie zu einem Ausgang werden. Die Teilfunktionen weisen dabei eine Umwandlung des jeweiligen Flusses auf und werden in das Funktionsmodell als Rechtecke dargestellt. STONE et al. (1998) stellen in ihrer Arbeit eine Auflistung vordefinierter Funktionen vor, die bei der Bezeichnung der Teilfunktionen verwendet werden. Nachdem die einzelnen Ströme aufgestellt sind, werden sie in einem Funktionsmodell verbunden und zusammengeführt und gegebenenfalls mit weiteren Teilfunktionen ergänzt. Abbildung 3-10 zeigt das aufgestellte, umsatzorientierte Funktionsmodell des untersuchten Kolbenventils.

Im dritten Schritt der Methodik findet auf Basis der Funktionsmodellierung die Modulidentifikation statt. Dafür werden verschiedene Funktionsheuristiken angewendet. STONE et al. (1998) beschreiben in ihrer Arbeit drei Funktionsheuristiken, die in diesem Kontext für die Identifikation von Modulen verwendet werden. Diese werden wie folgt definiert:

Dominant Flow

Durch die Anwendung der Funktionsheuristik des dominierenden Flusses werden alle Teilfunktionen als Modul definiert, die durch einen Fluss verbunden sind, der vom Eingang in das Funktionsmodell bis zum Ausgang oder bis zur Wandlung innerhalb des Modells, durchgängig ist.

Branching Flow

Dabei werden alle Teilfunktionen, die nach Teilung eines Flusses nicht zum Haupt- oder dominierenden Fluss gehören, als Modul definiert. Jeder „Zweig“ nach der Teilung stellt dabei ein eigenes Modul dar.

Conversion-transmission modules

Bei Anwendung dieser Heuristik wird eine Teilfunktion oder Funktionskette, die einen Durchfluss umwandelt oder eine Weiterleitung als Aufgabe hat, als Modul verstanden.

Durch die Anwendung dieser drei Funktionsheuristiken auf das zuvor aufgestellte Funktionsmodell des Kolbenventils werden Module identifiziert, die in Abbildung 3-11 graphisch veranschaulicht werden. Die drei Heuristiken führen meistens zur Identifikation unterschiedlicher Module. Es ist aber möglich, dass das gleiche Modul auch bei der Anwendung unterschiedlicher Heuristiken identifiziert wird. Doch die vollständige Identifikation von allen möglichen Modulen kann nur durch die Anwendung der drei Heuristiken innerhalb eines Produkts erreicht werden (STONE et al. 2000). Auf diese Weise wurden die Module 1, 4 und 6 durch die Heuristik *dominant flow* und die Module 2, 3 und 5 durch die Heuristik *conversion-transmission module* identifiziert.

Aufgrund der funktionsbasierten und demzufolge eher abstrakten Analyse sowie dem standardisierten Ansatz für die Funktionsmodellierung eines Produkts kann diese Methode leicht optimiert werden, um mehrere Produktvarianten bei der Modulidentifikation beziehungsweise -definition zu berücksichtigen (ZAMIROWSKI & OTTO 1999).

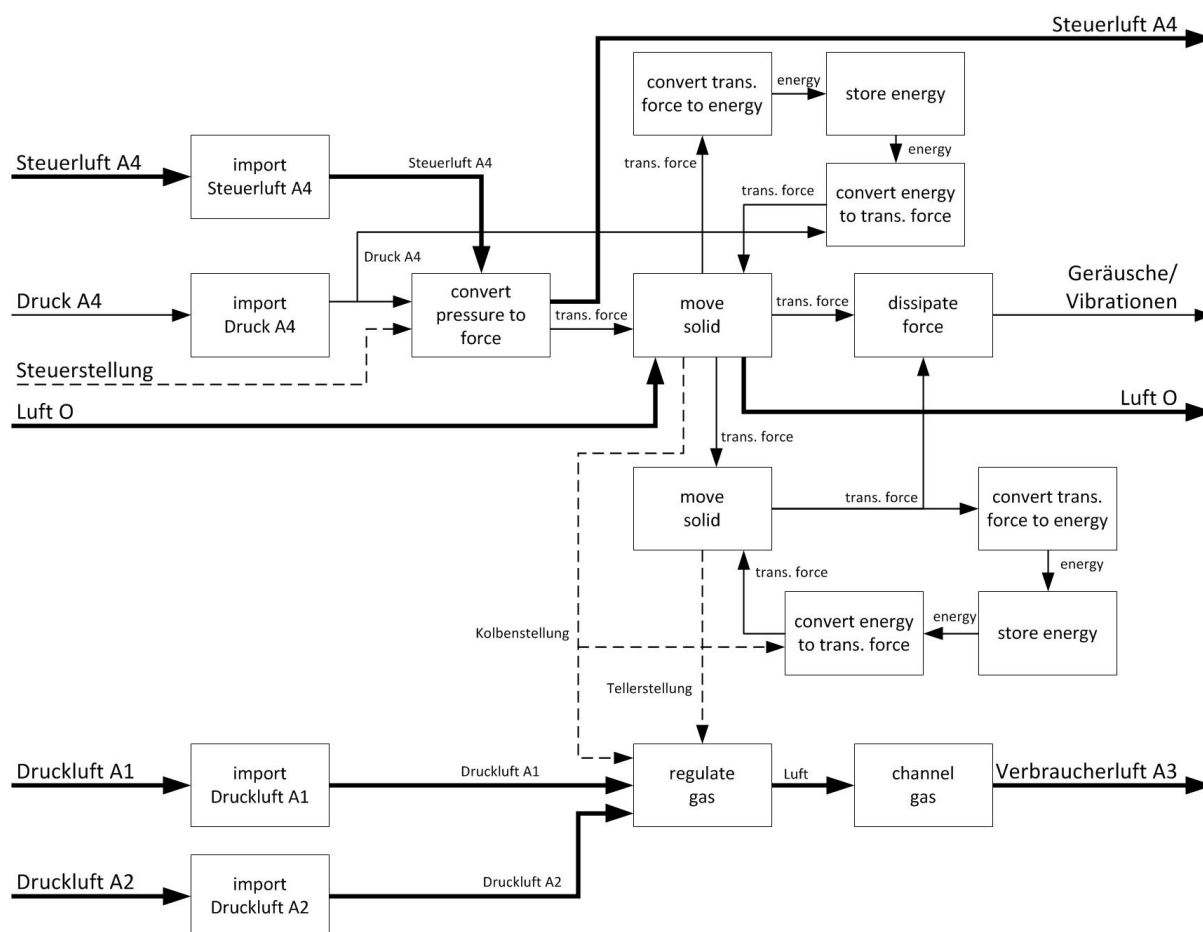


Abbildung 3-10: Funktionsmodell des Kolbenventils (ENBLIN 2011)

Um dies zu ermöglichen haben ZAMIROWSKI & OTTO (1999) zwei weitere Heuristiken entwickelt, die die Variantenvielfalt in einer Produktfamilie optimieren. Diese zwei *Variety Heuristics* zielen darauf hin, alle Teilfunktionen, die nicht in allen Produktvarianten vorkommen, in gesonderten Modulen auszulagern, oder mit Hilfe einer Anpassung der Funktionsstruktur die Variantenvielfalt gezielt zu reduzieren.

Diese Methode ist somit nicht nur für die Modularisierung von einzelnen Produkten geeignet, sondern kann auch für die Modularisierung einer variantenreichen Produktfamilie angewendet werden (DANIILIDIS et al. 2011a, S. 6f.). Dennoch sind die geringe Wiederholbarkeit und Robustheit der Ergebnisse von der Methode ein großer Nachteil des Ansatzes (HÖLTTÄ-OTTO & SALONEN 2003). Eine ausführlichere Darstellung der Methode kann in der Literatur aufgefunden werden (vgl. STONE et al. 1998, STONE et al. 2000 und ENBLIN 2011).

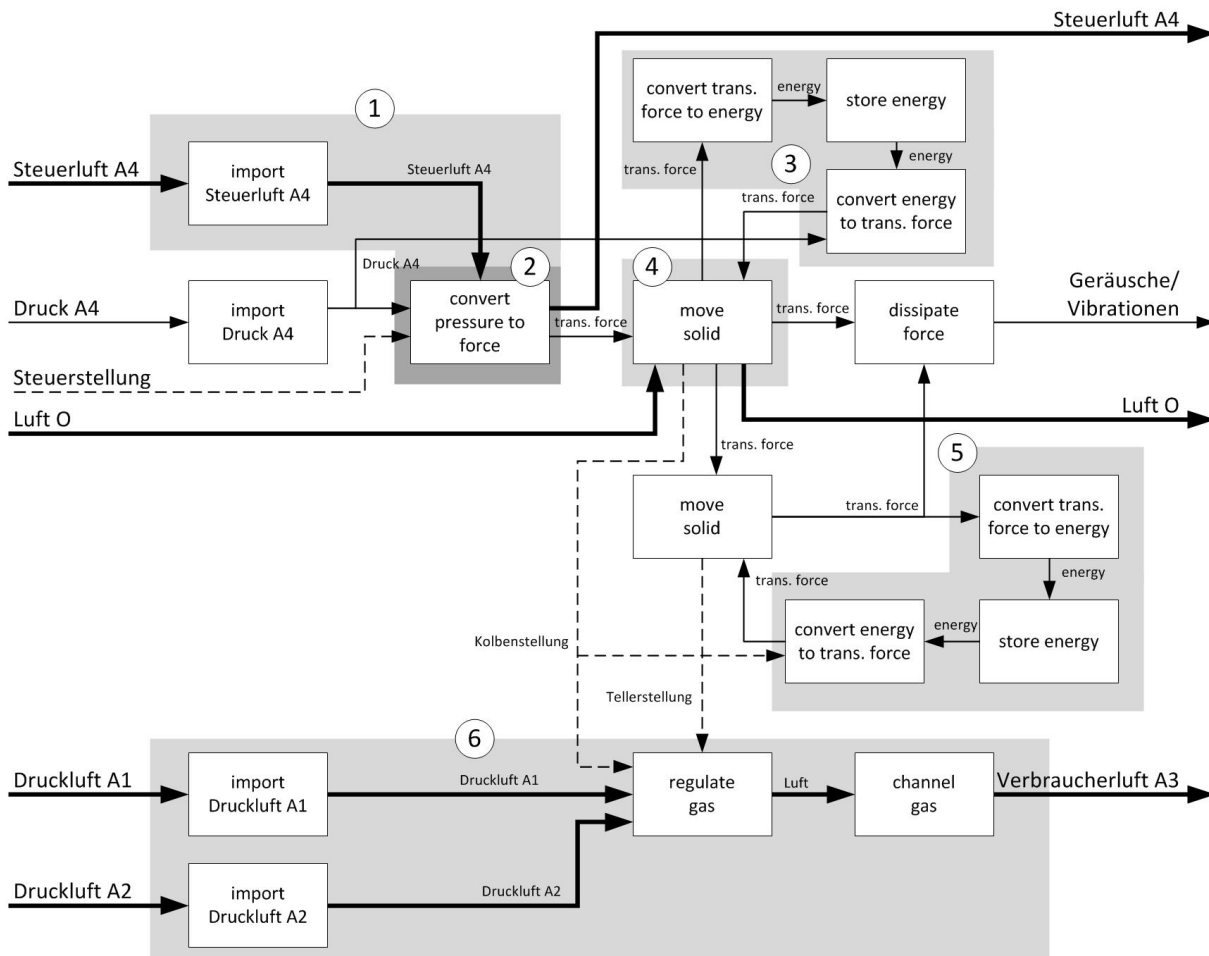


Abbildung 3-11: Veranschaulichung der identifizierten Module (ENBLIN 2011)

DSM Clustering

Im Kapitel 3.1.2 wurde die *Design Structure Matrix* (DSM) (STEWART 1981) im Kontext des strukturellen Komplexitätsmanagements vorgestellt. In den letzten Jahrzehnten hat sich die DSM in der Produktentwicklung als Werkzeug und Methode zur Analyse von Produktstrukturen und -architekturen bewährt (BROWNING 2015). PIMMLER & EPPINGER (1994) haben in ihrer Arbeit die DSM für die Analyse und das bessere Verständnis der Wechselwirkungen zwischen den Elementen eines komplexen Systems beziehungsweise einer komplexen Produktstruktur verwendet mit dem Ziel den Entwicklungsprozess zu vereinfachen. Darüber hinaus konnten durch die Analyse alternative Designs untersucht werden, die Produktqualität erhöhen und die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen reduzieren. Auf Basis dieser Methodologie hat BROWNING (2001) einen *clustering* Algorithmus auf die komponentenbasierte DSM angewendet, sogenannte *cluster* in der Produktstruktur zu erkennen. Ein *cluster* wird dabei als eine Gruppe von Elementen, die viele interne Abhängigkeiten und vergleichsweise wenige externe Abhängigkeiten besitzt, definiert (MAURER 2007). Ein Modul im Gegensatz dazu ist eine Gruppe von Komponenten,

die durch interne Veränderungen betroffen ist, durch externe hingegen kaum. Ein Cluster entspricht folglich einem potenziellen Modul. Der Algorithmus versucht dabei die Kanten der DSM, die die physischen Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen darstellen, möglichst nah der Diagonale umzupositionieren indem die Knoten der Matrix umgeordnet werden. Dadurch können *cluster* beziehungsweise Module identifiziert werden, die Subsysteme oder Baugruppen in der Produktstruktur darstellen (BROWNING 2001) (siehe auch Abbildung 3-12). Um die Suche nach geeigneten Modulen in einer Produktstruktur zu optimieren haben YU et al. (2003) die Kombination eines genetischen Algorithmus (GA) mit dem *minimum description length* Prinzip (MDL), das auch von BROWNING (2001) verwendet wurde, vorgestellt. Aufgrund des genetischen Algorithmus sind die Ergebnisse – das Umordnen der Knoten der DSM – nicht immer die gleichen (YU et al. 2003). Dabei sind YU et al. (2007) zu dem Ergebnis gekommen, dass die Kombination von GA und MDL zur Identifikation von Modulen in den Produktstrukturen komplexer Produkte sehr ähnliche Ergebnisse mit den Produktexperten generiert (YU et al. 2007).

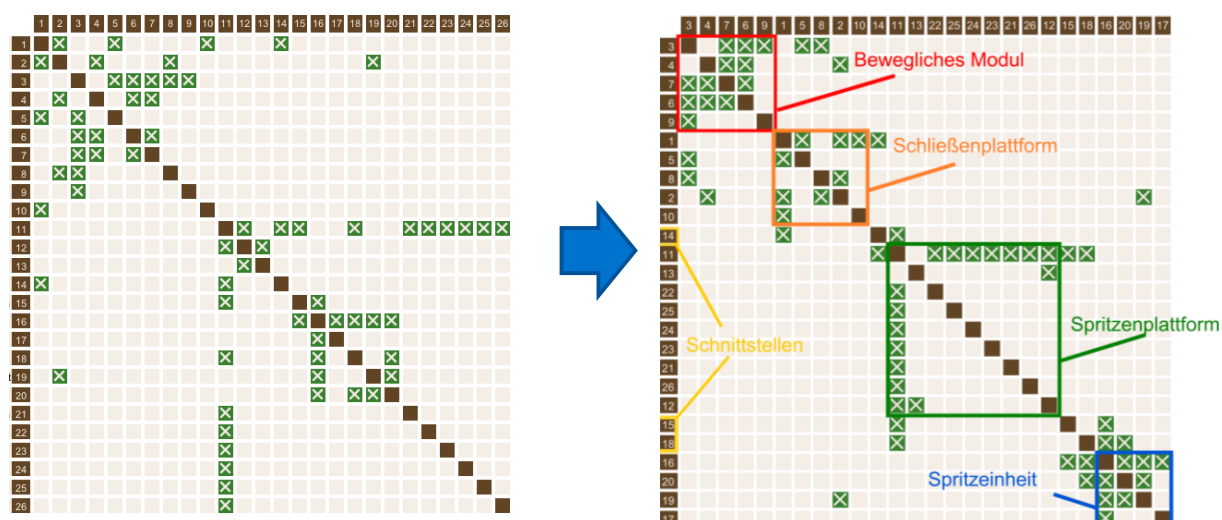


Abbildung 3-12: Anwendung eines *clustering* Algorithmus zur Identifikation von Modulen in der Produktstruktur einer Spritzgussmaschine von Krauss Maffei Technologies for Plastic (BLÖCHL 2011)

Wie auch aus der Abbildung 3-12 ersichtlich wird, tritt beim *clustering* selten der Idealfall vor, dass alle Abhängigkeiten innerhalb der *cluster* gebündelt werden können. Diese Abhängigkeiten, die praktisch die Schnittstellen zwischen den *cluster* bilden, sollen im Rahmen einer Produktoptimierung durch Modularisierung möglichst eliminiert werden (LINDEMANN et al. 2009). Um die eindeutigen Grenzen eines *cluster* und demzufolge auch den optimalen Umfang eines Moduls zu identifizieren müssen komplexe Produktenstrukturen mit Hilfe von Kennzahlen untersucht werden (siehe Kapitel 3.2.2). Diese Kennzahlen dienen dazu, sowohl die Modularität der Struktur zu beurteilen als auch bei der Moduldefinition zu unterstützen.

Außer der Betrachtung einer einzelnen Domäne und Abhängigkeitsart der Produktarchitektur, wie beispielsweise der komponentenbasierten Produktstruktur, ist es in der Produktentwicklung technisch sinnvoll und für die Erreichung einer modularen Produktarchitektur zielführender mehrere Betrachtungsdomänen in die Analyse und Modularisierung mit einzubeziehen

(LINDEMANN et al. 2009). So ist es von großer Bedeutung auch funktionale Abhängigkeiten zwischen den physischen Komponenten bei der Modularisierung zu berücksichtigen. Auch bei dieser Multiansichts-Analyse kann das gleiche Verfahren mit der DSM, wie vorher beschrieben, angewendet werden. Dabei werden alle DSM's mit den unterschiedlichen Abhängigkeitsarten überlagert und die resultierende DSM mit Hilfe eines *clustering* Algorithmus neu angeordnet. Je nach Anwendungssituation können auch weitere Abhängigkeitsarten in der Betrachtung berücksichtigt werden. Beispiele dafür sind organisations- und prozessbedingte Abhängigkeiten zwischen den physischen Komponenten (GÖPFERT 2009, DANILIDIS et al. 2011b). Ferner kann der Informations-, Energie- und materielle Austausch zwischen den Komponenten in die Betrachtung miteinbezogen werden, um beispielsweise Module aus dem Aspekt der Adaptabilität des Produktes zu definieren (ARTS et al. 2008). Ein weiterer Vorteil dieser multidimensionalen Abhängigkeitsbetrachtung ist die frühe Erkennung von Konflikten bei der Identifikation von Modulen in einer Produktarchitektur.

Das Vorhaben der Modularisierung wird komplexer, wenn es sich nicht nur um ein einzelnes Produkt handelt – wie bisher der Fall war – sondern, wenn alle Betrachtungsdomänen einer Produktarchitektur bei der Modulidentifikation berücksichtigt werden müssen (siehe auch Abbildung 1-5). Im Kap. 1.1.2 wurde erläutert, dass im Kontext dieser Arbeit sowohl die physische und funktionale Betrachtungsdomäne als auch die verschiedenen Varianten zu den relevanten Betrachtungsdomänen einer Produktarchitektur gehören. Um die Modularisierung also einer Produktfamilie zu ermöglichen, ist es erforderlich die Analyse auf einer abstrakteren Ebene durchzuführen. Wie bisher gezeigt, war es sinnvoll für ein einzelnes Produkt eine komponentenbasierte DSM mit verschiedenen Abhängigkeitsarten zu *clustern*, um Module zu identifizieren. Für mehrere Produktvarianten, die sich strukturell und physisch voneinander unterscheiden, ist die Anwendung einer komponentenbasierten DSM allerdings nicht möglich. Demzufolge ist es technisch zielführend, das DSM *clustering* auf der funktionalen Ebene durchzuführen. Auf diese Weise können Funktionsmodule entlang des Variantenspektrums identifiziert werden und in einem nächsten Schritt können den Funktionsmodulen alternative konstruktive Umsetzungen zugeordnet werden (DANILIDIS et al. 2010).

Design for Variety

Die *Design for Variety (DfV)* Methode wird von MARTIN M. (2002) als eine Reihe von strukturierten Methoden beschrieben, welche die Reduzierung des Einflusses der Variantenvielfalt auf die Lebenszykluskosten eines Produktes als Aufgabe haben. Die Methode wurde erstmals von ISHII et al. (1995) vorgestellt und wurde seitdem von verschiedenen Autoren weiterentwickelt (ISHII et al. 1995, ALLEN & CARLSON-SKALAK 1998, FUJITA & ISHII 1997, FUJITA et al. 1999, FUJITA & YOSHIDA 2001, KIPP & KRAUSE 2008). Durch *DfV* werden ein reduzierter Entwicklungsaufwand sowie die Erreichung einer schnelleren Marktreife für zukünftige Produktgenerationen ermöglicht. Um dies zu erreichen wird eine möglichst standardisierte und modularisierte Produktarchitektur angestrebt. Dabei werden zwei Indizes benutzt, um eine Produktarchitektur hinsichtlich des Anpassungsaufwandes und der Varianz zu beurteilen, die wie folgt definiert werden:

Generational Variety Index (GVI)

Der *Generational Variety Index* gibt an, wie umfangreich eine erwartete und erforderliche Anpassung einer Produktkomponente ist, um die zukünftigen Marktbedürfnisse zu erfüllen.

Coupling Index (CI)

Der *Coupling Index* beschreibt inwieweit zwei Komponenten voneinander abhängig sind. Dabei ist der CI von zwei Komponenten umso größer, je wahrscheinlicher es ist, dass die Änderung der einen Komponente zwangsläufig die Anpassung der anderen Komponente erfordert.

Anhand dieser beiden Indikatoren wird eine Produktarchitektur beurteilt. Dabei werden die Komponenten der Produktarchitektur tabellarisch anhand des GVI geordnet und mit den Werten des CI ergänzt. Auf Basis des GVI und der Entwicklungskosten der einzelnen Komponenten wird im nächsten Schritt festgelegt, welche Komponenten vorrangig standardisiert und in Modulen zusammengefasst werden, um daraus eine optimierte Produktarchitektur zu entwickeln (ENBLIN 2011).

Eine Besonderheit der Methode ist, dass sie sowohl für die Analyse und Optimierung der Struktur eines einzelnen Produktes angewendet werden kann, als auch für die Betrachtung mehrerer Produktvarianten. Zusätzlich können in die Methode weitere Informationen bezüglich möglicher zukünftiger Anforderungen einfließen und auf diese Weise kann die Entwicklung von Folgegenerationen unterstützt werden (MARTIN M. 2002).

Weitere Methoden

Ausgehend von den Prinzipien der *Design for Variety* Methodik haben BLEES C. et al. (2010) ein Vorgehen für die Analyse und Reduzierung der internen Variantenvielfalt entwickelt, das auf die Betrachtung der einzelnen Komponenten fokussiert. Mit Hilfe des sogenannten *Variety Allocation Models* (VAM) werden die Variantentreiber und die Varianz auf allen Produktkonkretisierungsebenen visualisiert. Zusätzlich werden die Beziehungen zwischen den Ebenen und den Varianten dargestellt. Ausgehend von den Variantentreibern und den *DfV* Indizes wird versucht, die interne Variantenvielfalt auf allen Produktkonkretisierungsebenen zu reduzieren. In einem nächsten Schritt findet die eigentliche Modularisierung des optimierten Konzeptes statt. Dafür kommen die Modularisierungstreiber von *MFD* in Anwendung und die Module werden unter Betrachtung der einzelnen Produktlebensphasen identifiziert und definiert (BLEES 2011, KIPP et al. 2010).

Übersicht über existierende Methoden

In der Literatur können verschiedene Arbeiten zur Beurteilung der existierenden Analyse- und Modularisierungsmethoden gefunden werden. GERSHENSON et al. (2003, 2004) haben zwei umfassende Artikel für die Modularisierung, die Messbarkeit der Modularität und die verschiedenen Modularisierungsmethoden veröffentlicht (GERSHENSON et al. 2003, GERSHENSON et al. 2004). JIAO et al. (2007), FIXSON (2007) und KIPP (2012) geben in ihren Arbeiten eine umfassende Übersicht und Diskussion über bereits existierende Modularisierungsmethoden. HÖLTTÄ-OTTO & SALONEN (2003) haben die Methoden *DSM Clustering*, *function heuristics* und *MFD* auf jeweils zwei verschiedene Produkte und eine

Produktfamilie angewendet. Dabei haben sie die drei Methoden bezüglich der Wiederholbarkeit der Ergebnisse, der Anwendbarkeit auf Produktfamilien und der Identifikation von Modulschnittstellen beurteilt und gegenübergestellt. Sie sind zu dem Ergebnis gekommen, dass jede Methode bei gleicher Ausgangssituation unterschiedliche Ergebnisse liefert, was darauf zurückzuführen ist, dass jede Methode verschiedene Anwendungssituationen hat. GUO & GERSHENSON (2004) und GERSHENSON et al. (2004) stellen in ihren Arbeiten einen weiteren Vergleich zwischen vier Methoden zur Modularisierung vor und diskutieren unter anderem die Wiederholbarkeit der Ergebnisse und Robustheit der Methoden. Abschließend bieten DANILIDIS et al. (2011a) eine umfangreiche Literaturrecherche über Modularisierungsmethoden. In dieser Arbeit wird auch eine systematische Kategorisierung der Methoden vorgeschlagen, um den Methodenvergleich und die Methodenauswahl zu unterstützen. DANILIDIS et al. (2011a) erwähnen in ihrer Arbeit außerdem weitere Methoden zur Modularisierung und variantengerechte Gestaltung von Produktarchitekturen, wie zum Beispiel *Holonic Product Design* (GERSHENSON et al. 2004) und *House of Modular Enhancement* (HOME) (GU & WATSON 2001, GU & SOSALE 1999).

Da die meisten Methoden spezifische Anwendungssituationen haben und verschiedene Möglichkeiten und Schwachstellen aufweisen, schlagen DANILIDIS et al. (2011a) ferner drei Kategorisierungskriterien vor, um die Anwendbarkeit der verschiedenen Modularisierungsmethoden eindeutig zu beschreiben. Dabei handelt es sich einerseits um die Möglichkeit eine größere Variantenvielfalt bei der Anwendung der Methode zu berücksichtigen. Andererseits stellen die verschiedenen Lebensphasen eines Produktes oder einer Produktfamilie ein weiteres Kategorisierungsmerkmal dar. Darüber hinaus wird zwischen Methoden zum Redesign beziehungsweise Reengineering eines bestehenden Produktes oder Produktarchitektur und Methoden, die die Neuproduktentwicklung unterstützen können, unterschieden (DANILIDIS et al. 2011a, ENBLIN 2011). Abbildung 3-13 zeigt eine graphische Darstellung dieser drei Kategorisierungsmerkmale sowie deren Skalierung.

Zudem haben DANILIDIS et al. (2011a) drei Modularisierungsmethoden auf drei unterschiedliche Produkte eines Produktportfolios angewendet und verglichen, mit dem Ziel die Methoden anhand der vorher definierten Kategorisierungskriterien zu ordnen. Anhand der Ergebnisse dieses Vergleiches und der Literaturrecherche wurden anschließend die Methoden in das Kategorisierungsschema eingeordnet (Abbildung 3-14).

Auch im Rahmen dieser Arbeit ist diese Kategorisierung von großer Bedeutung, denn dadurch kann eine situationsgerechte Methodenauswahl unterstützt werden. Im Kapitel 4.4 wird diese Kategorisierungsmethodik weiterentwickelt, so dass auch die jeweilige Perspektive einer Analyse mit berücksichtigt werden kann.

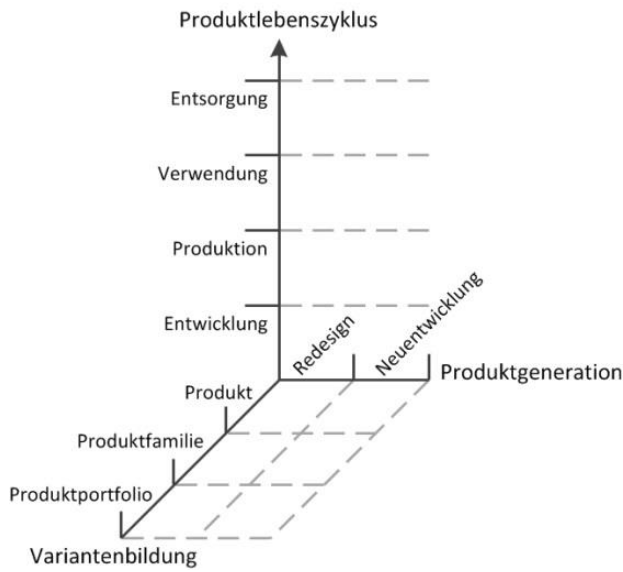
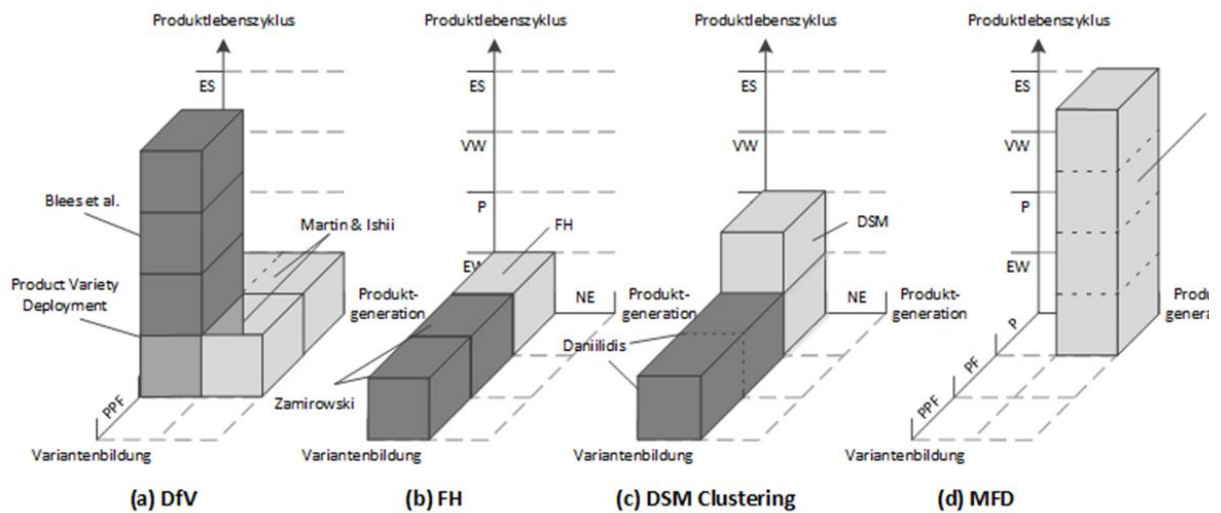


Abbildung 3-13: Kategorisierungsmerkmale für Modularisierungsmethoden (DANILIDIS et al. 2011a)



- Legende**
 DfV: design for Variety
 FH: function heuristics
 MFD: modular function deployment
 DSM: design structure matrix

Abbildung 3-14: Kategorisierung von Modularisierungsmethoden nach DANILIDIS et al. 2011a

3.2.2 Erkennung von Verbesserungspotential

In den vorherigen Abschnitten wurden Ansätze und Methoden vorgestellt um Produktarchitekturen modular zu gestalten und zu optimieren. Für die Beurteilung der Modularität und die Erkennung von Schwachstellen in einer Struktur ist die Anwendung von

Kennzahlen auf Grundlage matrixbasierter Methoden zielführend. Dabei können diese Kennzahlen sowohl für die Bewertung des aktuellen Standes einer Produktarchitektur als auch für die Definition eines Zielzustandes herangezogen werden.

In der Literatur kann eine Vielzahl von unterschiedlichen Kennzahlen und Metriken, die Strukturmerkmale²³ beschreiben, gefunden werden (HÖLTTÄ-OTTO & DE WECK 2007, HÖLTTÄ-OTTO et al. 2012, DE WECK 2007, MARTIN & ISHII 1997, NEWCOMB et al. 1998). Dabei können die Strukturmerkmale sich sowohl auf die Struktur eines Produktes oder einer Produktarchitektur als auch auf die Struktur eines Prozesses oder einer Organisation beziehen. Außerdem sind Strukturmerkmale für eine Strukturanalyse unabdingbar. Im Rahmen dieser Arbeit stehen die Modulidentifikation und die Variantenperspektive einer Produktarchitektur im Vordergrund. Aufgrund dessen werden in diesem Kapitel Metriken zur Beurteilung der Modularität und der Variantengenerierung sowie allgemeine Kennzahlen, die sich in der Produktentwicklung bei der Analyse einer Produktstruktur und Charakterisierung von Strukturelementen bewährt haben, vorgestellt.

Solche Kennzahlen, die sich auf ein spezifisches Element einer Struktur beziehen, sind beispielsweise die Aktiv- und Passivsumme, die Aktivität und Kritikalität des Elementes (MAURER 2007, S. 124). Bei der **Aktivsumme** werden alle ausgehenden Abhängigkeiten eines Elementes addiert und sie gibt darüber Aufschluss, ob das Element bestimmend (aktiv) ist. Auf der anderen Seite werden bei der **Passivsumme** alle eingehenden Abhängigkeiten addiert und sie lässt Rückschlüsse darauf zu, ob es sich um ein passives Element handelt (LINDEMANN 2009, S.75). Um einen einfachen Vergleich zwischen Strukturelementen zu ermöglichen, wird die sogenannte **Aktivität** benutzt. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis von Aktiv- zu Passivsumme (LINDEMANN 2009). Die **Kritikalität** wird bei der Strukturanalyse dafür benutzt, um besonders kritische Elemente in einer Struktur zu identifizieren. Als solche gelten die Elemente, die mit einer Vielzahl von ein- und ausgehenden Relationen stark mit den restlichen Elementen vernetzt sind und eine zentrale Lage in der Struktur besitzen. Das Maß der Kritikalität ergibt sich aus dem Produkt aus Aktiv- und Passivsumme des jeweiligen Elementes (MAURER 2007, S. 125).

Eine weitere Möglichkeit bietet die sogenannte *degree centrality*, wobei hier die Aktiv- und Passivsumme addiert werden (SOSA et al. 2000, VAN-EIKEMA-HOMMES 2008). Um den Abstand eines Elementes von der restlichen Struktur und damit seine Zentralität in der Struktur beurteilen zu können, bietet sich die sogenannte *closeness* beziehungsweise *closeness centrality* (MAURER 2007, VAN-EIKEMA-HOMMES 2008). Je höher die *closeness centrality* ist, desto näher steht das Element zu den Elementen, mit denen es vernetzt ist. SOSA et al. (2007) argumentieren, dass je kleiner die *closeness* Werte in einer Struktur sind, desto modularer ist die Struktur aufgebaut (SOSA et al. 2007). VAN-EIKEMA-HOMMES (2008) wendet die *closeness centrality* sowie weitere Metriken an verschiedene Beispielstrukturen an, um die Anwendbarkeit der Metriken bezüglich der Beurteilung der Modularität zu untersuchen. Er kommt dabei zu dem Schluss, dass bei Anwendung der *closeness centrality* die Modularität eines Systems unzureichend beurteilt werden kann. Nichtsdestotrotz bietet die *closeness*

²³ Vgl. MAURER 2007.

centrality eine Möglichkeit, um Schlüsselemente zur Modularisierung einer Struktur zu erkennen.

Wenn Strukturelemente nicht direkt miteinander in Relation stehen sondern nur über weiteres Brückenelement, so wird dieses Element auch als „**Bus**“ bezeichnet (MAURER 2007). Eine Metrik, die solche Elemente in einer Struktur identifizieren kann ist die sogenannte *betweenness centrality* (VAN-EIKEMA-HOMMES 2008). Je höher die *betweenness centrality* eines Elementes ist, desto integrierter ist das Element in der Struktur (SOSA et al. 2007). Ähnlich wie bei der *closeness centrality* bietet die *betweenness centrality* eine Möglichkeit, um Schlüsselemente für die Modularisierung zu identifizieren (VAN-EIKEMA-HOMMES 2008). Außerdem können Elemente mit einer hohen *betweenness centrality* potenzielle Plattformkomponenten einer Produktstruktur entsprechen.

Ein wichtiges Strukturmerkmal bezüglich der Modularisierung einer Produktarchitektur sind die sogenannten *cluster*. Wie bereits im Kapitel 3.2.1 beschrieben wurde, bestehen *cluster* aus Elementen, die stark miteinander vernetzt sind. Dagegen besitzt ein *cluster* eine niedrige Anzahl von äußeren Abhängigkeiten. Um *cluster* in einer Struktur zu erkennen, ist die Anwendung einer geeigneten Metrik notwendig. VAN-EIKEMA-HOMMES (2008) untersucht hierfür verschiedene Metriken und stellt eine Übersicht mit den Möglichkeiten und der Anwendbarkeit dieser Metriken vor (VAN-EIKEMA-HOMMES 2008, S. 7). Wie aber auch im Kapitel 5 gezeigt wird, stellt sich oft die Kombination geeigneter Metriken zur Modulidentifikation als effizienter und zielführender dar. Ein Grund dafür ist, dass die Modularität einer Struktur nicht direkt gemessen werden kann, sondern ihr Maß kann nur indirekt auf Basis bestimmter Strukturmerkmale bestimmt werden (BIEDERMANN 2014, S. 50). Eine wichtige Eigenschaft von modularen Architekturen und Baukastensystemen stellt die **Kommunalität** innerhalb der Architektur dar (s. auch Kap. 3.1.3). Dabei kann die Kommunalität auch für die Beurteilung der Qualität beziehungsweise der Standardisierung in einer Produktarchitektur herangezogen werden (SIMPSON & D'SOUZA 2004). Weitere Eigenschaften von modularen Produktarchitekturen sind die **Kombinierbarkeit** der Module und die damit erforderliche **Schnittstellenstandardisierung** sowie die **Funktionsbindung** zu einer eindeutigen Zuordnung von Funktionen zu Modulen (JONAS 2014). Zur Komplexitätsreduzierung hinsichtlich Änderungsfortpflanzung und Abstimmungsaufwand trägt außerdem die **Entkopplung** der Module bei. Dem liegt die These zugrunde, dass mit jeder zusätzlichen Schnittstelle und Abhängigkeit zwischen den Modulen der Abstimmungsaufwand und die Komplexität in der Entwicklung steigen (SALVADOR 2007).

Ähnlich zum *cluster* stellt das *strongly connected part* ein weiteres wichtiges Strukturmerkmal dar, das ein Teilsystem einer Struktur beschreiben kann. Dabei handelt es sich um ein Teilsystem, bei dem alle Elemente direkt oder indirekt voneinander abhängig sind (MAURER 2007). Man könnte also behaupten, wenn dieses Teilsystem eine relativ geringe Anzahl an Schnittstellen mit der restlichen Struktur besitzt, dass es sich um ein potenzielles Modul handelt.

Der **Vernetzungsgrad** (*degree of connectivity*) bildet eine wichtige Metrik auf Teilsystem- oder Systemebene, die die Dichte der Relationen im betrachteten System angibt. Der Vernetzungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der Relationen zwischen den Strukturelementen zu der Anzahl der möglichen Relationen in diesem Teilsystem (MAURER

2007). Bei einem *strongly connected part* nimmt also der Vernetzungsgrad den Wert 1. Eine ähnliche Metrik, die die **Dichte** von Relationen angibt, wurde von WHITNEY et al. (1999) vorgestellt (WHITNEY et al. 1999). Dabei wird ein System oder Teilsystem unter Berücksichtigung des Verhältnisses aus der Anzahl der Relationen zu der Anzahl der Elemente beurteilt.

Eine Vielzahl weiterer Metriken und Strukturmerkmale, die zur Analyse der Struktur einer Produktarchitektur oder auch eines Entwicklungsprozesses herangezogen werden können, kann in der Literatur gefunden werden (DE WECK et al. 2003 JIAO & TSENG 2004, MAURER 2007, KREIMEYER 2009).

Im oberen Abschnitt wurden Metriken und ein paar Strukturmerkmale näher vorgestellt, die für die Zielsetzung dieser Arbeit von Relevanz sind und für die Identifikation und Definition von Modulen sowie Plattformen in einer Produktarchitektur angewendet werden können. Nichtsdestotrotz stellt sich die Frage, wie weitere Betrachtungsdomänen – beispielsweise Varianten – und Perspektiven – beispielsweise Montageprozess – in einer Strukturanalyse miteinbezogen werden können. Wie im Kapitel 2.3.3 beschrieben wurde, stellen die Reduktion der internen Variantenvielfalt und die Verschiebung der Variantengenerierung zu einem möglichst späten Punkt im Montageprozess erweiterte Möglichkeiten eine Produktarchitektur zu optimieren dar. Um diese Aspekte einer Produktarchitekturoptimierung zu untersuchen erweisen sich aber die bereits vorgestellten Methoden und Metriken als ungeeignet. Deswegen werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Metriken auf Basis des Variantenbaums (siehe Kap. 2.3.3) entwickelt, mit denen der aktuelle Zustand einer Produktarchitektur bezüglich Variantengenerierung und Breite der Variantenvielfalt beurteilt.

Diese Überlegungen lassen sich anhand des Variantenbaums (siehe auch Abbildung 2-17) übersichtlich darstellen (siehe Abbildung 3-15). Auf diese Weise, illustriert Nummer 1, dass der Variantenbaum insgesamt schlanker werden soll, indem die interne Variantenvielfalt reduziert wird. Bei einer gleichbleibenden externen Varianz bedeutet dies, dass über einen breiten Bereich der Montagekette nur wenige variante Zwischenerzeugnisse und Bauteile gehandhabt werden müssen. Die Nummer 2 deutet an, dass der Punkt, an dem im Montageprozess Varianten erzeugt werden, möglichst am Ende des Prozesses verlagert werden soll (vgl. auch Postponement-Strategie). Dieser Punkt wird im Rahmen dieser Arbeit *Diversifikationspunkt V* genannt (MOOSBAUER 2012). Schließlich illustriert die Nummer 3 eine Reduktion der Gesamtanzahl an Montageschritten. Dies kann sowohl durch eine Parallelisierung von (Teil-) Montageabfolgen als auch durch eine tatsächliche Reduzierung der Montageschritte erreicht werden.

Um aussagekräftige Metriken zu entwickeln, ist eine detaillierte Betrachtung des Variantenbaums notwendig. Folglich werden die Elemente im Variantenbaum ähnlich zu einem Koordinatensystem über zwei Werte definiert. Element (k, n_k) bezeichnet also die n_k -te Variante im k -ten Montageschritt. Dadurch lässt sich folgendes Verhältnis definieren

$$p_k = \frac{n_{k+1}}{n_k}$$

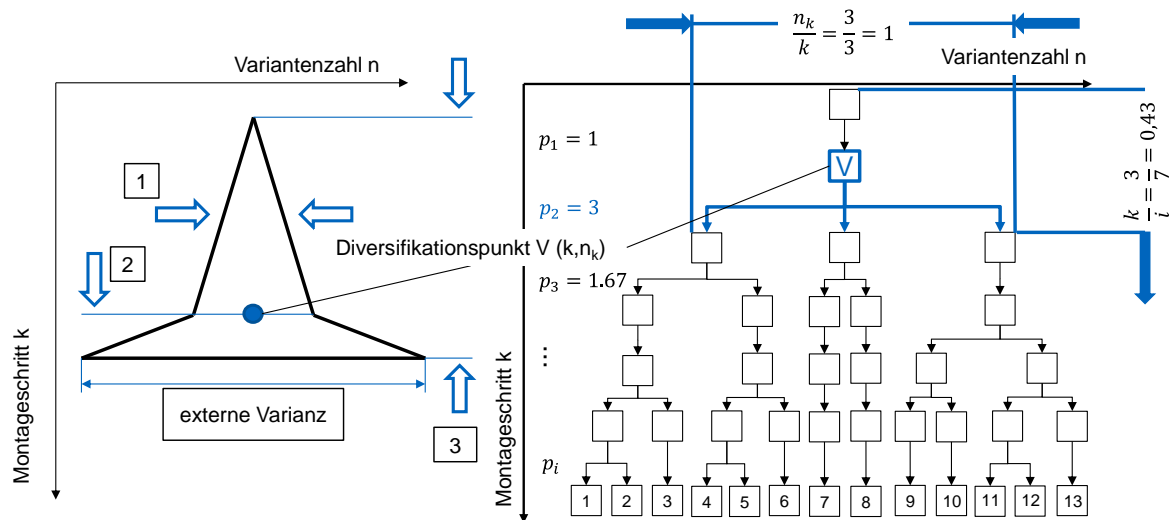


Abbildung 3-15: abstrakte Veranschaulichung der Aspekte der Variantengenerierung anhand des Variantenbaums

Damit kann die Aussage getroffen werden, in welchem Maße die Anzahl der Varianten über einen Prozessschritt anwächst. Überschreitet $p^k = p^{k \rightarrow k+1}$ einen bestimmten Grenzwert beim Schritt von k nach $k+1$, so wird dieser Punkt als der Diversifikationspunkt $V(k, n_k)$ bezeichnet. Dieser Grenzwert p_{crit} ist situationspezifisch zu definieren (siehe auch Kapitel 5.2). Um die Verschiebung von V und die Reduktion der Vielfalt beurteilen zu können, bieten sich die Verhältnisse $\frac{n}{k}$ und $\frac{k}{i}$ an. Wobei i die Gesamtanzahl der Montageschritte angibt.

Dabei ist es wichtig anzumerken, dass diese drei Verhältnisse gemeinsam für die Beurteilung einer Ebene des Variantenbaums herangezogen werden müssen. Auf diese Weise soll das Verhältnis n/k möglichst verringert werden und gleichzeitig das Verhältnis k/i möglichst den Wert 1 einnehmen und das auf der Ebene p_{crit} des Variantenbaums (siehe Abbildung 3-15).

4. Systematisches Vorgehen zur Analyse von Produktarchitekturen

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte Vorgehensweise zu einer schrittweisen Planung von Architekturanalysen stellt ein Vorgehen auf der Ebene der operativen Arbeitsschritte dar (siehe Abbildung 2-2). Ziel des Vorgehens ist die systematische und methodische Unterstützung der Analyse und Verbesserung von Produktarchitekturen mit Schwerpunkt auf die Entwicklung von modularen Architekturen sowohl bei einzelnen Produkten als auch bei variantenreichen Produktfamilien.

Die Analyse der übergeordneten Situation und die Definition von Prioritäten stellt eine essentielle Aufgabe vor dem Beginn jedes Analysevorhabens und Methodeneinsatzes dar (BRAUN & LINDEMANN 2003, LINDEMANN 2009, S. 29). Die übergeordnete Situation wird von verschiedenen Unternehmensfaktoren beeinflusst und bestimmt zum größten Teil den anzuwendenden Ansatz. Zudem die Unternehmenssituation hat einen Einfluss auf die Analyseperspektive sowie auf die konkreten Methoden, die für die Durchführung der Analyse notwendig sind.

Ausgehend von der übergeordneten Situation soll zunächst das Analyseziel konkretisiert werden und der Ansatz für die Erreichung dieses Zieles bestimmt werden. Im Folgenden ist das Analysevorhaben konkreter zu planen. Dabei ist einerseits festzulegen auf welche Konkretisierungs- und Detaillierungsebenen die Analyse durchgeführt werden muss und andererseits welche Perspektiven und Betrachtungsdomänen einer Produktarchitektur relevant sind. Dadurch wird die konkrete Auswahl geeigneter Methoden unterstützt. Zudem müssen bereits existierende Methoden an die jeweilige Situation angepasst beziehungsweise auf eine geeignete Art und Weise in einer Methodik kombiniert werden. An dieser Stelle ist auch zu definieren nach welchen Kriterien der aktuelle Zustand einer Produktarchitektur beurteilt werden soll. Diese Kriterien sind dann auch für einen abschließenden Soll-Ist-Vergleich heranzuziehen, um die Effektivität der durchgeführten Maßnahmen zu evaluieren. Abschließend ist die eigentliche Analyse und Methodenanwendung mit dem Ziel der Erkennung von Verbesserungspotenzial durchzuführen.

Zusammenfassend dienen die beiden ersten Schritte der Vorgehensweise dazu, die Frage zu beantworten *WAS* genau analysiert werden soll. Im Anschluss dieser Festlegung gilt dann zu definieren *WIE* die Analyse durchzuführen ist. Abbildung 4-1 zeigt eine übersichtliche Darstellung der einzelnen Schritte des Vorgehens.

Diese schrittweise Vorgehensweise ist nicht als ein starres Muster zu verstehen. Ähnlich wie beim Münchener Vorgehensmodell (MVM) (LINDEMANN 2009, S.47), sind oft Iterationen notwendig. Auf diese Weise ist es möglich, dass die Detaillierungs- und Konkretisierungsebene während der Durchführung der Analyse angepasst werden muss und eine neue Methode für das Fortfahren der Analyse herangezogen werden muss.

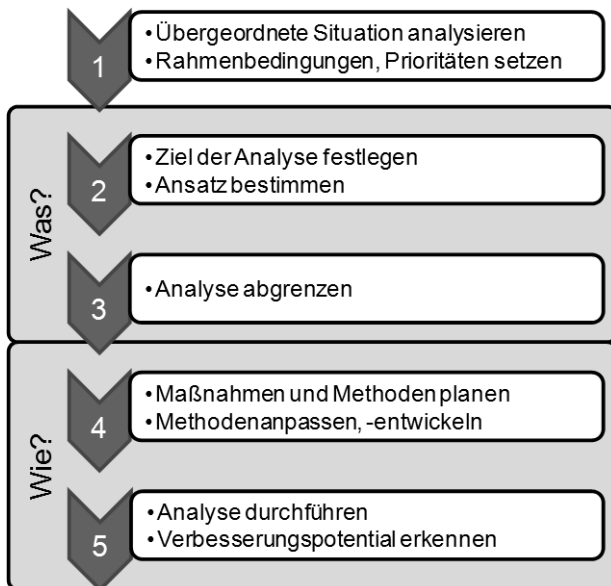


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Schritte der systematischen Vorgehensweise zur Analyse von Produktarchitekturen (DANIILIDIS et al. 2012a)

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte des Vorgehens näher erläutert. Ein besonderes Augenmerk wird dabei der Analyseplanung und der Methodenauswahl gewidmet, die den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen.

4.1 Situation analysieren

Wie bereits erläutert, stellt die übergeordnete Situation einen wichtigen Einflussfaktor für die Auswahl geeigneter Ansätze und Methoden dar. Des Weiteren spielt die Anwendungssituation bei der Definition und Priorisierung konkreter Ziele und Stoßrichtungen für die Analyse einer Produktarchitektur und der Entwicklung einer modularen Produktarchitektur eine besondere Rolle.

Um die Situationsanalyse zu systematisieren, wird in Anlehnung an PONN & LINDEMANN (2011) sowie aus den im Kapitel 3.2.1 gewonnenen Erkenntnissen für die Kategorisierung von Modularisierungsmethoden, eine Liste mit Merkmalen und möglichen Ausprägungen definiert (siehe Abbildung 4-2). Zudem wurden in Anlehnung an PROBST & ULRICH (1988) drei Stufen von Komplexität definiert, die von der Anzahl und Unterschiedlichkeit von Systemelementen und Wechselwirkungen sowie von der Vielfalt an Verhaltensmöglichkeiten abhängen. Mit Hilfe dieser Merkmale kann eine Anwendungssituation eindeutig beschrieben werden. Diese Eigenschaften können sowohl direkt als auch indirekt über die Bestimmung des zu verfolgenden Ansatzes mit der Methodenauswahl in Verbindung gebracht werden.

Ferner existieren Wechselwirkungen zwischen den Situationsmerkmalen. Bei Einzelfertigungen handelt es sich beispielsweise um hochkomplexe Anlagen, wobei die Reduzierung der Entwicklungszeit bzw. des –aufwands eine wichtige Stoßrichtung der Analyse

bezeichnet (HEBLING 2006, HAMIDI 2012). Dagegen stellt bei Serien- oder Massenfertigung die Montage und Fertigung eine wichtige Perspektive für die Verbesserung einer Produktarchitektur dar. Unabhängig von der Fertigungsart erweist sich die Funktionserfüllung bei Neuentwicklungen häufig als die Hauptzielsetzung. Bei späteren Anpass- oder Variantenentwicklungen konzentriert sich die Entwicklung auf weitere Zielsetzungen, wie zum Beispiel die Reduktion von Kosten, Entwicklungszeiten, etc. (PONN & LINDEMANN 2011). Auf diese Weise kann anhand der schrittweisen Beschreibung der übergeordneten Situation die Konkretisierung der Zielsetzung des Analysevorhabens erfolgen.

Merkmal	mögliche Ausprägungen		
	Einzelfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
Fertigungsart	Einzelfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
Komplexität	niedrig (Bauteil, Baugruppe)	mittel (Maschine)	hoch (Anlage)
Art der Entwicklungsaufgabe	keine Vorgabe (Neuentwicklung)	Prinzip (Anpassentwicklung)	Entwurf (Variantenentwicklung)
Hauptzielsetzung / Stoßrichtung	Funktion	Kosten	Entwicklungszeit
	Montage/Fertigung	Lieferzeit	etc.
Umfang der Aufgabe	einzelnes Produkt	Produktfamilie / Baureihe	mehrere Produktfamilien / Produktprogramm

Abbildung 4-2: Merkmale und mögliche Ausprägungen von Analysesituationen in Anlehnung an PONN & LINDEMANN (2011), S. 11

Unabhängig von der Fertigungsart stellt die Erhöhung der Flexibilität gegenüber sich ändernder Kundenanforderungen ein weiteres Hauptziel einer Baukasten- oder Plattformstrategie dar (SCHENKL et al. 2011). Voraussetzung dafür ist die Identifikation von zyklischen Einflussparametern auf die Kundenanforderungen sowie die Optimierung der Wissensbasis in einer Unternehmensorganisation (SCHMIDT et al. 2014, SCHMIDT et al. 2013). Da die Situationsanalyse und ihre Zusammenhänge nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit abbilden, wird hier auf eine weitere Detaillierung verzichtet. Dennoch wird im nächsten Schritt auf Basis der festgelegten Situationsmerkmale das Analyseziel konkretisiert und der anzuwendende methodische Ansatz bestimmt.

4.2 Analyseziel planen und Ansatz bestimmen

In diesem Schritt ist die Hauptzielsetzung des Analyse- und Verbesserungsvorhabens zu konkretisieren und der Ansatz zu bestimmen, mit dem diese Zielsetzung erreicht werden kann. Das Analyseziel wird von der jeweiligen Situation beeinflusst und kann stark variieren. Eine praktische Möglichkeit, das Ziel der Analyse aus der Situation abzuleiten und zu konkretisieren, besteht bei der Betrachtung der Situationsmerkmale „Stoßrichtung“ und „Analyseumfang“.

Auf diese Weise können abhängig von der definierten Stoßrichtung die relevanten Geschäftsbereiche für die Zielsetzung der Analyse identifiziert werden. Besitzt beispielsweise die Montage eine Schlüsselrolle bei der Beschreibung der Anwendungssituation, kann daraus eine Optimierung des Montageprozesses als übergeordnetes Analyseziel festgelegt werden.

Handelt es sich dabei um ein einzelnes Produkt, stellt die Reduzierung und Parallelisierung der Montageschritte eine Konkretisierung dieser Zielsetzung dar (DANIILIDIS et al. 2012b). Zusätzlich besitzt der Zeitpunkt der Generierung der externen Varianz im Montageprozess bei variantenreichen Produktarchitekturen eine besondere Rolle (WILDEMANN 2005). Die Realisierung einer möglichst späten Variantengenerierung im Herstellungsprozess – auch Postponement-Strategie genannt – ist somit bei der Konkretisierung des Analyseziels zu berücksichtigen. Zudem stellt die Prozessschritt-Kommunalität eine weitere Verbesserungsrichtung für den Herstellungsprozess dar (KIPP 2012). Dafür ist Produktarchitektur so zu gestalten, dass unabhängig von der Variantenvielfalt gleiche Fertigungs- und Fügeverfahren sowie Vorrichtungen benutzt werden können.

Ähnlich erweist sich die Reduktion der internen Komplexität und Varianz bei komplexen und variantenreichen Produktarchitekturen eine weitere Möglichkeit, um Kosten, Entwicklungszeit und –aufwand zu verbessern (BLEES 2011). Die Komplexitätsreduzierung kann zum Beispiel durch strukturelle Entkopplung auf Modulebene zur Reduzierung der Schnittstellen zwischen den Modulen erfolgen. Zudem stellen die Eins-zu-eins Zuordnung zwischen Komponenten und Funktionen und die Reduzierung der Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Variantentreiber weitere konkrete Maßnahmen zur Variantenreduzierung dar (KIPP 2012, S. 54).

Die Entwicklungszeit und der Entwicklungsaufwand sind gerade bei Unternehmen des Anlagenaufbaus und der Einzel- beziehungsweise der Kleinserienfertigung mit kurzen Entwicklungszyklen ein wichtiger Kostenschwerpunkt (HEBLING 2006). In solchen Situationen erweist sich die Erhöhung der Flexibilität bei der Entwicklung kundenindividueller Lösungen und Produkte als eine geeignete Strategie, um die Entwicklungs- und Lieferzeit zu verkürzen und das Unternehmen an sich ändernden Kundenwünschen anpassungsfähiger zu gestalten (BÖHL 2000). Voraussetzung dafür ist eine Erhöhung der Kombinierbarkeit und Skalierbarkeit der Produktarchitektur und folglich die Festlegung von standardisierten Schnittstellen zwischen Modulen und von einheitlichen Fügeverfahren und Montageprozessschritten.

Zusammenfassend können exemplarisch folgende Analyseziele aufgelistet werden:

- Reduktion der internen Varianz / Komplexität
- Reduktion der Entwicklungszeit / des Entwicklungsaufwandes
- Reduktion von Kosten
- Optimierung der Funktionalität / Produktqualität
- Optimierung der Variantengenerierung - Postponement
- Optimierung des Montageprozesses – Parallelisieren, Prozessschritt-Kommunalität
- Erhöhung der Flexibilität / Kombinierbarkeit der Architektur

Wie bei den Situationsmerkmalen existieren auch hier Abhängigkeiten zwischen den Analysezielen. Eine Reduktion der Entwicklungszeit erfordert die Reduktion der internen Komplexität und bringt zudem eine Kostenreduktion mit sich (WILDEMANN 1998). Dennoch ist die Berücksichtigung des Entwicklungsprozesses und eventuell des Prozesses der Auftragsabwicklung essentiell, um eine Reduktion der Entwicklungszeit zu erreichen. Dagegen wäre die Betrachtung des Entwicklungsprozesses, um die interne Varianz zu reduzieren, nicht zwingend erforderlich.

Im nächsten Schritt ist der strategische Ansatz zu bestimmen, wie die definierten Zielsetzungen erreicht werden können. Im Rahmen dieser Arbeit werden exemplarisch vier verschiedene Ansätze für die Gestaltung von Produktarchitekturen erwähnt, die einen maßgeblichen betriebswirtschaftlichen Einfluss besitzen (CHATRAS & VINCENT 2015, WILDEMANN 2005 S.150). Dabei handelt es sich um folgende Ansätze:

- modulare Produktarchitekturen
- Plattformstrategien
- Baukastenentwicklung
- Standardisierung

Wie im Kapitel 2.3.2 näher erläutert wird, sind die Grenzen zwischen den verschiedenen Produktarchitekturen fließend. Ein Baukasten kann sowohl Plattformkomponenten beinhalten als auch eine Plattformstrategie integrieren. Zudem können Standards in Form von Wiederhol-, Gleich- und Normteilen innerhalb eines Baukastens definiert werden (PAHL et al. 2006). Nicht zuletzt können Standards auch auf der Baugruppen- und Modulebene definiert werden. Ferner ist eine geeignete Modularität der Produktarchitektur eine Voraussetzung sowohl für eine Baukasten- als auch für eine Plattformentwicklung.

Analyseziel	Ansatz			
	modulare Produktarchitekturen	Plattformstrategien	Baukastenentwicklung	Standardisierung
Reduktion der internen Varianz / Komplexität	●	○	○	●
Reduktion der Entwicklungszeit / -aufwandes	●	●	●	○
Reduktion der Kosten		○	○	●
Optimierung der Funktionalität / Produktqualität	○		○	○
Optimierung der Variantengenerierung	●	●	○	
Optimierung des Montageprozesses	●	●	●	○
Erhöhung der Flexibilität	●	●	○	

○ indirekter / mittelbarer Zusammenhang
 ● direkter / unmittelbarer Zusammenhang

Abbildung 4-3: Eignung der strategischen Ansätze zur Gestaltung von Produktarchitekturen auf die Verfolgung der jeweiligen Analyseziele

Aufgrund der Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Arten von Produktarchitekturen werden zwei Arten von Zusammenhängen zwischen Analysezielen und Ansätzen definiert (siehe Abbildung 4-3). Dabei wird zwischen direkten beziehungsweise unmittelbaren Zusammenhängen und indirekten, mittelbaren Zusammenhängen unterschieden. Ein

strategischer Ansatz besitzt einen direkten Zusammenhang mit einem Ziel, wenn die Verfolgung des Ansatzes die unmittelbare Erreichung des Ziels als Folge hat. Auf diese Weise kann durch Standardteile eine Erhöhung der produzierenden beziehungsweise der eingekauften Mengen und eine Reduktion der zu verwaltenden Artikelnummern erreicht werden, die eine Kostenreduktion als Ergebnis haben. Dagegen führt eine Plattformstrategie nur mittelbar zu einer Kostenreduktion aufgrund der Standardisierung der Plattformelemente. Mit diesen Zusammenhängen soll die Eignung des jeweiligen Ansatzes für die Verfolgung der Analyseziele gezeigt werden und die Auswahl eines geeigneten Ansatzes unterstützt werden.

Es stellt sich heraus, dass der Baukasten als übergeordneter Ansatz, der sowohl Plattformen als auch Standards integrieren kann, für die Verfolgung aller definierten Analyseziele geeignet ist. Wichtig dabei sind der Umfang sowie eine geeignete Ausrichtung der Baukastenentwicklung.

4.3 Analyse abgrenzen

Nachdem das Analyseziel sowie der anzuwendende Ansatz festgelegt worden sind, soll das Analyseprojekt konkretisiert und der Anwendungsraum der Maßnahmen abgegrenzt werden. Die Abgrenzung der Analyse findet anhand der im Kapitel 2.1 vorgestellten Dimensionen und Ebenen der Produktbeschreibung statt. Hierzu werden in Anlehnung an das Münchener Konkretisierungsmodell (MKM) zwei Beschreibungsdimensionen definiert (siehe Abbildung 4-4). Im Zusammenhang mit dem definierten Umfang der Aufgabe wird die Analyse auf die Dimension vom **Abstrakten zum Konkreten** und auf die Dimension vom **Groben ins Detail** abgegrenzt. Um die Abgrenzung zu erleichtern, werden auf der Dimension vom Abstrakten zum Konkreten vier Abstraktionsebenen definiert.

- Funktionsebene
- Wirk-/Konzeptebene
- Bauebene
- Technologieraum

Ähnlicherweise werden auf die Dimension vom Groben ins Detail vier Detaillierungsebenen festgelegt.

- System-/Produktebene
- Teilsystem-/Baugruppenebene
- Systemelement-/Komponentenebene
- Konstruktionsmerkmale /-elemente

Festlegung der Abstraktionsebene

Ausgehend vom strategischen Ansatz soll zunächst die Abstraktionsebene definiert werden, auf der der Ansatz angewendet wird. Es ist also zu konkretisieren, auf welcher Ebene beispielsweise Standards zu definieren sind. Die Standardisierung kann, wie die anderen Ansätze, auf verschiedenen Ebenen angewendet werden. In variantenreichen Produktprogrammen ist es zielführend, dass Standards sowohl auf der Funktions- als auch auf der Prinzipienebene definiert werden. Für die Umsetzung der Prinzipien können dann standardisierte konstruktive Lösungen festgelegt werden mit dem Ziel die unnötige Generierung von Varianten in der Entwicklung zu vermeiden. Auf ähnliche Weise können

Module nicht nur auf der physischen Komponentenebene einer Produktarchitektur bestimmt werden, sondern auch auf der Funktionsebene.

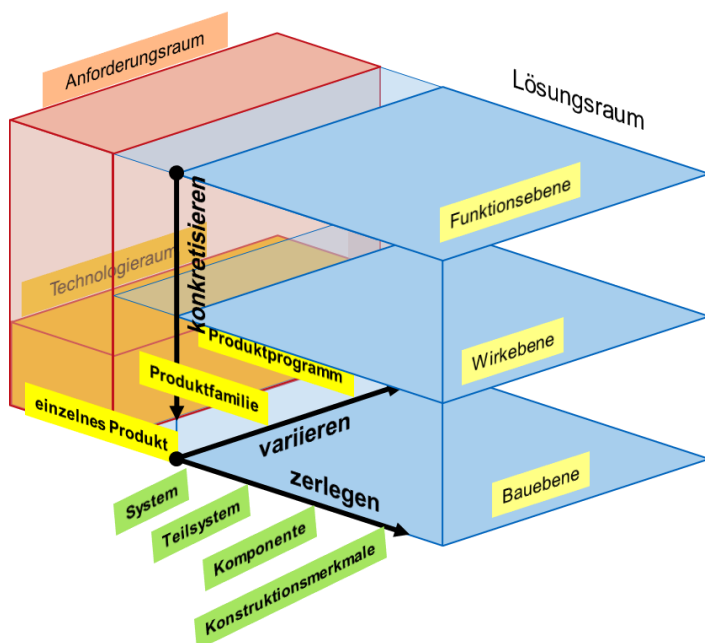


Abbildung 4-4: Bestimmung des Anwendungsraumes der Analyse anhand der Produktbeschreibungsdimensionen

Bei bestimmten Situationen ist die Anwendung eines Ansatzes oder Maßnahme auf den konkreteren Ebenen nicht ohne Weiteres möglich. Die Art der Entwicklungsaufgabe und der Analyseumfang sind Situationsmerkmale, die die Durchführbarkeit einer Maßnahme auf eine konkrete Beschreibungsebene beeinflussen. Dafür ist es in den frühen Phasen von Neuentwicklungen nicht möglich, die Modularität des Produktes auf der Bauebene zu analysieren und Standards oder Plattformkomponenten zu definieren. Grund dafür ist der Mangel an Informationen bezüglich der Komponenten und deren Wechselwirkungen. Infolgedessen ist die Untersuchung parallel mit der Konkretisierung der Architektur durchzuführen. Auf Basis der aufgestellten Funktionsstruktur des neuen Produktes sind Module auf der Funktionsebene zu definieren, die in den nächsten Phasen der Entwicklung in Baugruppen bzw. physischen Baugruppen konkretisiert werden (vgl. Kapitel 5.2). Ähnlicherweise sind bei variantenreichen Produktarchitekturen oder bei breiten Analyseumfängen die ersten Phasen einer Analyse auf einer abstrakten Ebene durchzuführen (vgl. Kapitel 5.3).

Festlegung der Detaillierungsebene

Wie in der Dimension vom Abstrakten zum Konkreten ist die Detaillierungsebene der Analyse zu definieren. Dabei erfordern bestimmte strategische Ansätze, wie die Standardisierung auf der Bauebene, eine detaillierte Betrachtung der Komponenten. Um dies zu ermöglichen, sind die Komponenten weiter zu analysieren und ihre Konstruktions- beziehungsweise

Unterscheidungsmerkmale zu identifizieren. Auf diesem Detaillierungsniveau können dann Ähnlichkeiten und Unterschiede identifiziert werden, so dass eine Standardisierung durchgeführt werden kann. Dagegen stellt sich die Betrachtung auf der Bauteilebene als ausreichend, um in einer Produktarchitektur Module oder Plattformen und potenzielle physische Baugruppen zu identifizieren.

Festlegung der Perspektive der Untersuchung der Produktarchitektur

Außer der Bestimmung der Detaillierungs- und Abstraktionsebene ist es von großer Bedeutung, die Perspektive zu definieren, aus der die Produktarchitektur untersucht und verbessert werden soll (BAUER et al. 2011). Die Perspektive der Untersuchung wird oft von der Zielsetzung und der Stoßrichtung der Analyse gegeben. Stellt beispielsweise der Montageprozess den Schwerpunkt des Analysevorhabens dar, so ist die Produktarchitektur aus der Sicht des Montageprozesses aufzunehmen und zu untersuchen. Die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten einer Produktstruktur zeigen dabei keine geometrischen Abhängigkeiten, sondern werden aus der Montagereihenfolge abgeleitet. Ein auf Basis dieser Abhängigkeiten modularisiertes Produkt besitzt Module, die die Aufstellung eines modularen Montageprozesses ermöglichen. Ferner ist es zielführend, das jeweilige Ergebnis aus der physischen und funktionalen Perspektive zu überprüfen. Auf ähnliche Weise können ebenfalls der Entwicklungsprozess, die Entwicklungsorganisation sowie Aspekte der Nutzung eines Produktes durch den Kunden die Stoßrichtung der Analyse darstellen (DANILIDIS et al. 2011b, BLEES C. et al. 2010).

Die Abgrenzung des Analysevorhabens und die Definition der Ebenen, auf denen die Analyse stattfindet, sind nicht als ein starres Muster zu betrachten. Es ist oft der Fall, dass während der Durchführung der Analyse die Abstraktions- und Detaillierungsebene angepasst werden muss. Hauptsächlich bei der Definition von Standards ist es von großer Bedeutung, die Ähnlichkeiten und Unterschiede der betrachteten Elemente genau identifizieren zu können. Falls diese Aufgabe auf einer bestimmten Detaillierungsebene nicht möglich ist, ist die Analyse auf der nächst detaillierteren Ebene durchzuführen (siehe Kapitel 5.2).

4.4 Methoden auswählen und Methodik entwickeln

In den vorherigen Schritten wurden die übergeordnete Situation sowie das Analyseziel für die Produktarchitektur festgelegt. Folglich wurde der strategische Ansatz bestimmt, mit dem die Zielsetzung zu verfolgen ist, und der Betrachtungsraum der Analyse wurde anhand der Produktbeschreibungsebenen abgegrenzt. Auf dieser Basis findet im vierten Schritt die Auswahl geeigneter Methoden statt. Bei komplexen Analyseprojekten mit mehreren Zielsetzungen ist es notwendig, dass unterschiedliche Methoden zur Anwendung kommen müssen, um den verschiedenen Zielen gerecht zu werden. Diese Methoden sollen systematisch und abhängig voneinander angewendet und in einer Methodik integriert werden.

Der erste Schritt der Methodenauswahl findet anhand der im Kapitel 4.1 beschriebenen Situationsmerkmale statt. Maßgeblich für die Anwendbarkeit einer Methode sind der Umfang der Analyse sowie die Art der Entwicklungsaufgabe (vgl. Kapitel 3.2.1). Der Umfang der Analyse beschreibt die Variantenbreite der Betrachtung und bestimmt, ob es sich um ein

einzelnes Produkt, eine Produktfamilie oder ein Produktprogramm bestehend aus verschiedenen Produktfamilien handelt. Die Art der Entwicklungsaufgabe gibt die Art, Menge und den Detaillierungsgrad der über das Produkt oder die Produktfamilie verfügbaren Informationen an, die für die Methodenanwendung notwendig sind. Diese Situationsmerkmale entsprechen den Ausgangsbedingungen (Anforderungen, Ressourcen, Zielen) für eine Methodenauswahl und einen Methodeneinsatz nach BRAUN (2005). Anhand der oben genannten Situationsmerkmale werden im Rahmen dieser Arbeit zehn gängige Kernmethoden zur Analyse und Modularisierung von Produktarchitekturen kategorisiert (siehe Tabelle 4-1). In der Literatur kann eine Vielzahl weiterer Methoden gefunden werden. Diese stellen aber hauptsächlich Abwandlungen beziehungsweise Weiterentwicklungen der identifizierten Kernmethoden dar. Im folgenden Abschnitt soll, die Kategorisierung dieser Methoden kurz vorgestellt werden.

		Variantenbildung			Produktgeneration	
		einzelnes Produkt	Produktfamilie	Produktportfolio	Redesign	Neuentwicklung
Modular Function Deployment		●	○		●	●
Funktions- heuristiken	Stone et al.	●			●	○
	Zamirowski et al.		●		●	○
Integrated DfV and Modularization		●	○		●	
DSM Clustering		●	●			
Simultaneous Modularization of Product Family Variants			●	○	●	○
DfV & Product Variety Deployment		●	●		●	○
House Of Modular Enhancement		●			●	○
Modular Product Development		●	○		●	○
Contact & Channel Model		●			●	●

- geeignet
- bedingt geeignet

Tabelle 4-1: Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten einiger Modularisierungs- und Analysemethoden

Die von ERIXON (1998) vorgestellte Methode *Modular Function Deployment* (MFD) stellt eine funktionsbasierte Modularisierungsmethode von Produkten dar (siehe auch Kap. 3.2.1). Der Betrachtungsgegenstand der Methode sind einzelne Produkte. Dennoch ist es möglich MFD auch für die Analyse und Modularisierung eines breiten Variantenspektrums anzuwenden. Grund dafür ist die abstrakte Durchführungsebene der Methode. Außerdem kann MFD sowohl für Neuprodukt- als auch für Anpassentwicklungen angewendet werden. Dabei ist aufgrund des strategischen und relativ abstrakten Charakters von MFD die Auswahl und Anwendung dieser Methode für Neuentwicklungen von Produkten besonders sinnvoll.

Eine weitere gängige Methode zur Identifikation von Modulstrukturen auf Funktionsebene sind die Funktionsheuristiken (STONE et al. 2000, ZAMIROWSKI & OTTO 1999). Aufgrund des relativ detaillierten Funktionsmodells, das für die Anwendung der Heuristiken aufgestellt werden muss, ist die Anwendung der Methode für eine Neuproduktentwicklung nur bedingt geeignet. Die vorgestellten Heuristiken von STONE et al. (2000) und ZAMIROWSKI & OTTO (1999) unterscheiden sich in der Breite der betrachteten Varianz. Folglich eignet sich die

Weiterentwicklung der Methode durch ZAMIROWSKI & OTTO (1999) für die Modularisierung von Produktfamilien (ENBLIN 2011).

BLEES et al. (2010) haben in ihrer Arbeit eine Methodik „*Integrated DfV and Modularization*“ vorgestellt, die die Aspekte von *Design for Variety* zur Variantenanalyse und zur Reduktion der internen Variantenvielfalt sowie Plattform- und Modularisierungsaspekte integriert. Für die Identifikation potenzieller Module kommen die Modultreiber von MFD in Anwendung. Der erste Schritt der Methodik zielt auf die Visualisierung und Analyse der internen Varianz, um Standardisierungspotenziale zu erkennen. Im zweiten Schritt findet die Modularisierung auf der Komponentenebene aus verschiedenen Perspektiven des Produktlebenszyklus statt (vgl. Tabelle 4-3). Folglich ist der Einsatz der Methodik nur für Anpassentwicklungen geeignet. Zudem ist aufgrund der konkreten Durchführungsebene der Modularisierung die Anwendung der Methodik auf Produktfamilien nur bedingt möglich.

Die Design Structure Matrix (DSM) stellt eine gängige und verbreitete Methode zur Analyse von Produktstrukturen dar. Mit Hilfe der DSM können verschiedene Merkmale einer Struktur beurteilt werden und beispielsweise potenzielle Plattformelemente identifiziert werden (siehe auch Kap. 3.2.2). Außerdem können durch das *clustering* einer produktbezogenen DSM sogenannte *cluster* identifiziert werden, die potenziellen Module in der Struktur entsprechen (siehe Kap. 3.2.1). In der Literatur können verschiedene Methoden für den Einsatz von DSM zur Analyse und Modularisierung von Produkten gefunden werden (GAUSEMEIER et al. 2007, ULRICH & EPPINGER 2004, BROWNING 2001, STEWARD 2007). Je nach Abstraktionsebene kann *DSM clustering* sowohl für einzelne Produkte als auch für ein breites Variantenspektrum angewendet werden.

Um das Variantenspektrum eines Produktprogramms beziehungsweise einer Produktfamilie mit stark unterschiedlichen Produkten analysieren zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Methode *simultaneous modularization of product family variants* entwickelt. Diese Methode stellt eine umfassende Methodik dar, um auf einer abstrakten, funktionsbasierten Ebene Module und Plattformelemente entlang der Variantenvielfalt eines Produktprogramms zu erkennen (DANIILIDIS et al. 2010). Aufgrund der abstrakten Funktionsmodellierungsmethodik können dabei auch Varianten berücksichtigt werden, die auf der Komponentenebene Unterschiede aufweisen. Zudem kann dadurch die Methodik auch bei Neuproduktentwicklungen angewendet werden.

Mit *product variety deployment* haben FUJITA et al. (1999) eine Methode vorgestellt, um die Modularisierung und die Standardisierung auf Modulebene zu unterstützen (FUJITA et al. 1999). Der Betrachtungsraum der Variantenvielfalt kann dabei eine Produktfamilie beziehungsweise miteinander verwandte Produkte sein. Der Einsatz der Methode bei Neuentwicklungen ist aufgrund der benötigten Informationen für die Durchführung der Methode nur bedingt möglich. *House of modular enhancement* (HOME) ist eine Modularisierungsmethode, die für die Analyse einzelner Produkte herangezogen werden kann. Dabei werden Aspekte aus dem Produktlebenszyklus für die Moduldefinition in Betracht gezogen (GU & WATSON 2001). GÖPFERT (2009) stellt eine Methode vor (*modular product development*), um organisationale Aspekte bei der Modularisierung von Produkten zu berücksichtigen. Die Methode ist für Anpassentwicklungen einzelner Produkte geeignet. Letztlich haben ALBERS et al. (2008) mit dem *contact & channel model* eine Methode vorgestellt, die für die Modularisierung einzelner

Produkte im Rahmen von Redesignprozessen geeignet ist (ALBERS et al. 2008). Dennoch ist es nach der Ansicht des Autors dieser Arbeit möglich, diese Methode auch bei Neuentwicklungen einzusetzen. Grund dafür ist, dass die Methode auf die abstrakte Wirkprinzipienebene für die Modulidentifikation stützt. Zudem ist es ebenfalls denkbar über Wirkprinzipien einheitliche Module in einer Produktfamilie festzulegen. Voraussetzung dafür ist, dass die einzelnen Produkte der Produktfamilie die gleichen konstruktiven Konzepte besitzen.

Nachdem die Auswahl an Methoden anhand der Art der Entwicklungsaufgabe und der Breite der Varianz eingegrenzt worden ist, findet im zweiten Schritt der Methodenauswahl eine Kategorisierung der Methoden anhand der Abstraktionsebene statt (siehe Tabelle 4-2). Interessant anzumerken ist, dass die meisten Methoden auf der funktionalen Ebene in Anwendung kommen. Des Weiteren berücksichtigen ungefähr die Hälfte der Methoden sowohl die funktionale als auch die physische Struktur eines Produktes. Ausgehend von den Anforderungen an ein Produkt ist es nur mittels *DSM clustering* möglich, in der Funktions- und Produktstruktur Module oder weitere wichtige Strukturmerkmale zu identifizieren.

		Abstraktionsebenen				
		Anforderungen	Funktionen	Konzepte	Gestalt	Technologie
Modular Function Deployment			•			
Funktions-heuristiken	Stone et al.		•			
	Zamirowski et al.		•			
Integrated DfV and Modularization				○	•	
DSM Clustering		○	•		•	
Simultaneous Modularization of Product Family Variants			•			
DfV & Product Variety Deployment			○		•	○
House Of Modular Enhancement			•		•	
Modular Product Development			•		•	
Contact & Channel Model			•	•		

Tabelle 4-2: Einordnung der Methoden anhand der Anwendungsebene

Einen weiteren wichtigen Aspekt für die Methodenauswahl stellt die Perspektive beziehungsweise die Stoßrichtung der Analyse dar (siehe Kap. 4.3). Tabelle 4-3 gibt eine Übersicht über die möglichen Perspektiven, die von den jeweiligen Methoden realisiert werden können. Diese Perspektiven reichen von der Organisationsstruktur in der Entwicklung und dem Produktentstehungsprozess bis zu den unterschiedlichen Phasen eines Produktlebenszyklus sowie bis zu der eigentlichen Funktions- und physischen Baustruktur eines Produktes. Je nach eingesetzter Methode können beispielsweise Module aus verschiedenen Perspektiven identifiziert und definiert werden. Die Funktionsheuristiken werden zum Beispiel auf der Funktionsebene angewendet (siehe Tabelle 4-2) und zielen darauf, aus der funktionalen Sicht eine geeignete Modularität zu definieren (siehe Tabelle 4-3). Aufgrund der relativ konkreten und detaillierten Funktionsmodellierung können daraus konkrete Rückschlüsse für die physische Baustruktur gezogen werden. Andererseits besteht mittels *DSM clustering* die Möglichkeit, weitere Sichten für die Analyse und Modularisierung einer Produktarchitektur zu

berücksichtigen²⁴. Als Beispiel dafür werden der Montageprozess, die Organisationsstruktur und der Entwicklungsprozess genannt (SOSA et al. 2004, GÖPFERT 2009, REINHART et al. 2000b, DANILIDIS et al. 2011b). Für die Modularisierung eines Produktes aus der Perspektive der Organisationsstruktur wird zunächst die Organisationsstruktur aufgenommen und mittels einer *DSM* modelliert. Dabei können die Elemente der Struktur – je nach dem Granularitätsgrad der Betrachtung – Personen oder Abteilungen verkörpern. Diese Organisationselemente werden im Anschluss mit der physischen Baustruktur des Produktes in Verbindung gebracht und mittels einer *DMM* modelliert. Die Abhängigkeit zwischen Organisationselement und Bauteil kann dabei die Verantwortlichkeit dieses Bauteils abbilden. Aus diesen beiden aufgestellten Matrizen kann eine *Bauteil-DSM* abgeleitet werden, die dann *geclustert* und modularisiert wird (siehe Kap. 3.1.2). Diese *DSM* gibt nicht die eigentliche physische Baustruktur an, sondern die Struktur der Bauteile aus der Perspektive der Organisation.

	Perspektive / Stoßrichtung						
	Organisation	PEP	Montage	Nutzung	Entsorgung	Funktionsstruktur	physische Struktur
Modular Function Deployment			•	•	•	•	
Stone et al.						•	○
Funktions-heuristiken Zamirowski et al.						•	○
Integrated DfV and Modularization			•	•	•	○	•
DSM Clustering	•	•	•			•	•
Simultaneous Modularization of Product Family Variants						•	
DfV & Product Variety Deployment			•	•		•	•
House Of Modular Enhancement			•	•	•	•	•
Modular Product Development	•					•	•
Contact & Channel Model						•	•

Tabelle 4-3: Übersicht über die möglichen Stoßrichtungen und Perspektiven der Methoden

Nach der Auswahl einer geeigneten Methode für die Analyse der Produktarchitektur und für die Verfolgung der gesetzten Ziele ist es zielführend im nächsten Schritt eine geeignete Metrik auszuwählen, um den Ist-Zustand mit dem optimierten Zustand der Produktarchitektur zu vergleichen. Da sich bereits verschiedene wissenschaftliche Arbeiten mit dem Thema der Strukturmerkmale und -metriken befasst haben, wird im Rahmen dieser Arbeit auf diesem Themengebiet nicht näher eingegangen. Im folgenden Abschnitt wird lediglich ein praktisches Beispiel gegeben, wie die Auswahl einer geeigneten Kennzahl durchgeführt werden kann.

Im Kapitel 3.2.1 wurde ein *cluster* als ein Teilsystem, dessen Elemente stark voneinander abhängig sind und das eine relativ niedrige Anzahl von äußeren Abhängigkeiten aufweist, definiert. Ausgehend von dieser Definition können zwei Metriken eingesetzt werden, um Module zu identifizieren und zu hinsichtlich ihrer Qualität zu beurteilen. Einerseits kann mit Anwendung des Vernetzungsgrades (*degree of connectivity*) ein stark vernetzter Teilbereich identifiziert werden (MAURER 2007). Andererseits schlägt KREIMEYER (2009) die Anwendung der *fan criticality* (hier auch als Modulkritikalität bezeichnet), um die ein- und ausgehenden Abhängigkeiten eines Moduls zu beurteilen. Ein Modul soll also einen möglichst hohen internen Vernetzungsgrad in Kombination mit einer niedrigen Modulkritikalität aufweisen. Andererseits stellt sich ebenfalls die Anwendung der Vernetzungsgrades für den Bereich

²⁴ vgl. Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.2.1 *DSM clustering*

außerhalb der Modulgrenzen als zielführend dar (vgl. Kap. 5.2). Dabei soll der äußere Vernetzungsgrad einen möglichst niedrigen Wert annehmen. Auf diese Weise können auch unterschiedliche Konstellationen einer Produktarchitektur verglichen werden.

Methodikentwicklung

Gerade bei komplexen Projekten mit unterschiedlichen Zielsetzungen und zu verfolgenden Ansätzen stellt sich die Aufstellung einer systematischen Methodik als sinnvoll dar. Ziel der Methodikentwicklung ist die Planung des Methodeneinsatzes auf der elementaren Arbeitsebene. Die Aufstellung einer methodischen Vorgehensweise hängt dabei vom Umfang des Vorhabens sowie von der Anzahl der Perspektiven, die berücksichtigt werden müssen, ab.

In diesem Abschnitt wird ein Vorschlag für eine exemplarische Methodikentwicklung vorgestellt. Das Ziel der Methodik soll die Verbesserung der Modularität einer bestehenden Produktarchitektur sein. Die Perspektiven, die dabei berücksichtigt werden müssen, sind die Funktions- und physische Struktur der Produktarchitektur. Des Weiteren soll die Produktarchitektur einen hohen Standardisierungsgrad aufweisen sowie die Vorteile von Plattformelementen zu Nutze machen.

Wie im Entwicklungsprozess wird auch für die Integration der unterschiedlichen Ansätze – Standardisierung, Modularisierung und Definition von Plattformelementen – in einer Methodik ein Vorgehen vom Abstrakten zum Konkreten vorgeschlagen. Grund dafür ist, dass eine positive Änderung – beispielsweise eine Erhöhung des Standardisierungsgrades – auf einem abstrakten Niveau auf die konkreten Ebenen propagieren wird. In anderen Worten eine Reduktion der Varianz von unterschiedlichen Funktionen wird eine Reduktion der Anzahl von konstruktiven Ausführungen hervorrufen. Dabei ist es zielführend auf jeder Abstraktionsebene die Standardisierung als erste Maßnahme durchzuführen. Mit der Standardisierung sollen die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen kategorisiert und mit dem Ziel der Reduktion der Varianz untersucht werden. Auf Basis dieser optimierten und reduzierten Struktur sollen im nächsten Schritt potenzielle Module identifiziert und festgelegt werden²⁵. Dabei kann außerdem die Möglichkeit untersucht werden, Plattformelemente einzusetzen. Die Plattformen können sowohl die Struktur innerhalb eines Moduls als auch die komplette Produktstruktur betreffen (vgl. Abbildung 4-5). SCHULZ et al. (2011) stellen in ihrer Arbeit eine Übersicht über die möglichen Ausprägungen von Plattformen sowie über die möglichen Kombinationen zwischen modularen Produktarchitekturen und Plattformstrategien vor (GRESHAKE 2011). Abbildung 4-5 zeigt eine schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Aufstellung einer exemplarischen Methodik für die Entwicklung einer modularen Produktarchitektur. Die Definition von Plattformelementen findet dabei innerhalb der Module statt. Im Fall, dass das Plattformelement modulübergreifend definiert werden soll, findet die Plattformdefinition vor der Modularisierung statt (vgl. Abbildung 2-14).

Wichtig anzumerken ist, dass diese Vorgehensweise auch rekursiv angewendet werden kann. Die Standardisierung wird im ersten Schritt auf dem detaillierten Niveau der Elementarfunktionen beziehungsweise der Bauteile durchgeführt, um im Anschluss die

²⁵ vgl. BLEES et al. 2010

granularen Elemente in Module zusammenzufassen. Die festgelegten Module können dann in einem Vorgehen vom Detail zum Groben ebenfalls auf Standardisierungspotenzial untersucht werden. Somit lässt sich auch die Varianz in der Dimension vom Groben ins Detail berücksichtigen und gegebenenfalls reduzieren.

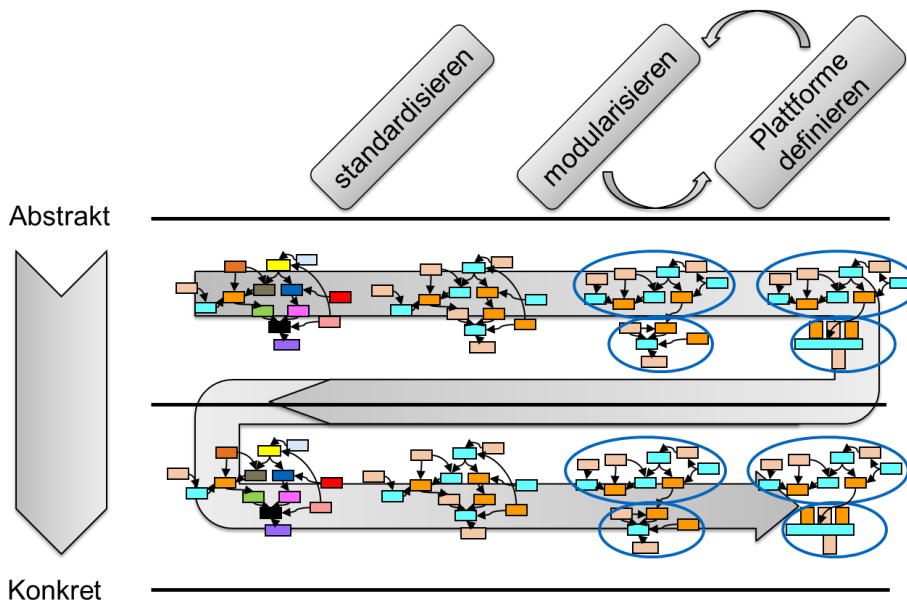


Abbildung 4-5: Beispiel einer Integration von unterschiedlichen Ansätzen und Maßnahmen in einer Methodik

4.5 Analyse durchführen

In den vorherigen Schritten wurde auf Basis der Anwendungssituation die konkrete Zielsetzung des Analysevorhabens festgelegt und der zu verfolgende strategische Ansatz bestimmt. Auf dieser Grundlage wurde nachfolgend die Methoden- und Maßnahmenauswahl durchgeführt. Die eigentliche Durchführung des Analysevorhabens bildet den letzten Schritt der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise und wird in diesem Kapitel näher erläutert. Dabei kann man auch bei der Analysedurchführung schrittweise und systematisch vorgehen. Abbildung 4-6 zeigt eine schematische Darstellung zur schrittweisen Analysedurchführung. Dieses allgemeine Vorgehen soll nicht als ein starres Muster betrachtet werden, sondern kann auch rekursiv auf detailliertere Ebenen zur Bewältigung elementarer Aufgaben angewendet werden.

Ähnlich wie bei der Vorgehensweise des strukturellen Komplexitätsmanagements (siehe Kapitel 3.1.2) sollen nach der Festlegung der Zielsetzung und der Methodenauswahl die notwendigen Informationen akquiriert werden. Ziel dabei ist die Erfassung des IST-Standes der betrachteten Produktarchitektur. Die Qualität der erfassten Informationen besitzt einen besonderen Einfluss auf die nachfolgende Analyse, die Richtigkeit der daraus gezogenen Schlussfolgerungen und der resultierenden Ergebnisse. Im Allgemeinen können Informationen über eine Struktur entweder explizit oder implizit in einer Organisation vorhanden sein.

Explizite Informationen in Form von Produktbeschreibungen, Prozesshandbüchern oder anderen Dokumentationen können ohne großen Aufwand akquiriert werden. Der Aufwand ist aber wesentlich höher, Informationen, die nicht explizit dokumentiert vorliegen und nur als implizites Expertenwissen in der Organisation vorhanden sind, zu erfassen. Solche impliziten Informationen sind mittels strukturierter Experteninterviews, Workshops oder anderer Wissensmanagementmethoden zu akquirieren. Häufige Fehler, die dabei auftreten können, ist das Verwechseln von indirekten und direkten Abhängigkeiten oder sogar der Wegfall oder die falsche Eintragung von Abhängigkeiten zwischen Systemelementen (KISSEL 2014). Dies führt zu einer fehlerhaften Modellierung des Systems und folglich zu falschen Interpretationen bezüglich Systemmerkmalen und -verhalten. Um die Akquise fehlerhafter Informationen zu vermeiden, sind besondere Techniken und Erfahrung seitens des Produktarchitekten notwendig. LINDEMANN et al. (2009) schildern die Problematik der genauen Informationsakquise in ihrer Arbeit detailliert und stellen ebenfalls Vorgehensweisen zur Erfassung impliziter Informationen vor. Ferner stellt sich die Durchführung einer Plausibilitätsanalyse und Reflexion der erfassten Informationen als unabdingbar dar. Eine einfache Möglichkeit, das aufgestellte Model auf Plausibilität zu überprüfen, ist durch die Ableitung indirekter Abhängigkeiten. Dabei soll überprüft werden, ob bereits bekannte indirekte Abhängigkeiten aus den erfassten direkten Abhängigkeiten sich ableiten lassen.

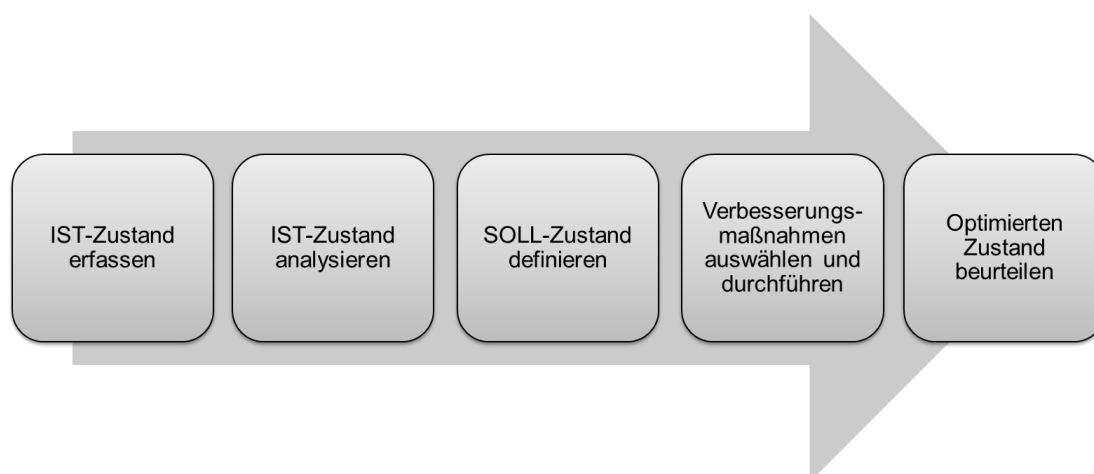


Abbildung 4-6: Schritte der Analysedurchführung auf Arbeitsebene

Ein wichtiger Bestandteil der Erfassung des aktuellen Standes der Produktarchitektur stellt die Modellierung und Visualisierung der akquirierten Informationen dar. Schon mit einer übersichtlichen Visualisierung einer Struktur können erste Strukturmerkmale erkannt werden. Diese Systemmodellierung und -visualisierung findet mit Hilfe der im vorherigen Schritt ausgewählten Analyse- und Modularisierungsmethoden statt. Wurden beispielsweise matrixbasierte Methoden ausgewählt, um die physische Modularität eines Produktes zu beurteilen und gegebenenfalls zu verbessern, so werden die akquirierten Informationen über die Produktstruktur direkt in einer *Design Structure Matrix* dokumentiert (MAURER et al. 2009).

Darüber hinaus kann bei komplexen Produkten die DSM als Leitfaden für die schrittweise Durchführung der Informationsakquise dienen, so dass keine Abhängigkeiten zwischen Systemelementen versehen werden.

Im zweiten Schritt der Analysedurchführung gilt es, den erfassten IST-Zustand der betrachteten Produktarchitektur hinsichtlich der festgelegten Zielsetzung zu analysieren. An dieser Stelle sind also die relevanten Strukturmerkmale und Kennzahlen einzusetzen. Geht es darum, die Modularität einer Produktarchitektur zu analysieren, so ist es sinnvoll, die aktuelle Struktur zu *clustern*, um Module zu identifizieren. Diese theoretischen Module sollen dann mit den tatsächlichen Modulen des Produktes verglichen werden und anhand geeigneter Strukturmerkmale und Metriken, wie beispielsweise *fan criticality*, *Vernetzungsgrad*, Anzahl der Schnittstellen zwischen den Modulen etc., beurteilt werden. Ziel dabei, ist Schwachstellen in der bisherigen Struktur zu erkennen und das Verbesserungspotenzial zu definieren.

Nach der Analyse der aktuellen Produktarchitektur und der Erkennung von Schwachstellen wird im nächsten Schritt ein Soll-Zustand für die verbesserte Struktur definiert. Ein verbesserter Soll-Zustand kann sich beispielsweise aus einer optimierten Zuordnung von Strukturelementen zu Modulen hinsichtlich der in den vorherigen Schritten definierten Kriterien ergeben. Dabei kann die Anzahl an Strukturelementen und Relationen gleich belassen werden und eine umfangreiche funktionale und konstruktive Anpassung des Produktes vermieden werden. Eine umfangreichere Verbesserung und Beseitigung von Schwachstellen kann allerdings eine technische Neugestaltung und Anpassung des Produktes bedeuten. Ziel dabei ist die Struktur – Art und Anzahl von Strukturelementen, Abhängigkeiten, Schnittstellen zwischen Modulen, etc. – funktional und konstruktiv so zu optimieren, dass der Unterschied zwischen dem analysierten Ist-Zustand und dem erwünschten Soll-Zustand hinsichtlich der definierten Kriterien zurückgesetzt wird. Ausgehend von der Definition eines Soll-Zustandes für die Produktarchitektur ist im Folgenden der Umfang und die Art der konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen auszuwählen und durchzuführen.

Unabhängig von der tatsächlichen Umsetzung der konstruktiven Änderungen an der Produktarchitektur kann im letzten Schritt des Analyse- und Verbesserungsvorhabens die optimierte Struktur bewertet und beurteilt werden. Für diesen Zweck können die Metriken und Methoden, die bei der Analyse des IST-Standes herangezogen wurden, angewendet werden. Dadurch wird ein direkter Vergleich zwischen den Strukturen ermöglicht. Zudem kann die Zielerreichung im Verhältnis zum definierten Soll-Zustand kontrolliert werden und gegebenenfalls können rekursiv weitere Maßnahmen zur Zielerreichung getroffen werden.

Um das in diesem Kapitel vorgestellte Vorgehen zur systematischen Planung und Durchführung von Produktarchitekturanalysen praxisorientierter zu erläutern sowie um dessen Effektivität zu demonstrieren, wird das Vorgehen im nächsten Kapitel auf drei Fallstudien angewendet. Anhand dieser Fallstudien wird anschließend die Evaluierung und Diskussion des Vorgehens stattfinden.

5. Fallstudien zur Demonstration und Erläuterung der Vorgehensweise zur systematischen Analyse von Produktarchitekturen

5.1 Fallstudie 1: Erkennung von Potentialen in der Produktarchitektur von Wasserheizgeräten

Kurzvorstellung des Projektes

Die Webasto Thermo & Comfort SE als führender Anbieter von Heizsystemen für die Automobilindustrie entgegnet den Herausforderungen aus dem erhöhten Wettbewerb und der gestiegenen Variantenvielfalt und Komplexität in dem gemeinsamen Projekt zur „Optimierung von Produktarchitekturen“. Übergeordnetes Ziel dabei ist die Schaffung von Transparenz über die Wechselwirkungen zwischen der Produktarchitektur und weiteren Bereichen, wie zum Beispiel dem Montageprozess und der Lieferantenstruktur. Der Betrachtungsgegenstand ist das Grundgerät der Familie der kleinen Wasserheizgeräte und seine Varianten. Die Entwicklung dieses Heizgeräts zeichnet sich durch eine Vielzahl an unternehmensinternen und -externen Stakeholdern (Kunden, Lieferanten, Montageprozess) aus, welche ihre spezifischen Anforderungen in das Entwicklungssystem einlasten (BEHNCKE et al. 2013a). Diese Anforderungen beschreiben neben den geforderten Funktionalitäten auch die unterschiedlichen Varianten der Heizgeräte, die vom Markt verlangt werden.

Bislang wurde diesem Umstand mit einer Vielzahl an unterschiedlichen konstruktiven Umsetzungen entgegnet. Diese führen jedoch zu einer hohen internen Variantenvielfalt und rufen eine höhere Komplexität im Unternehmen hervor. Damit sind u.a. die Auswirkungen von technischen Änderungen im Entwicklungs- und Herstellungsprozess nur unzureichend antizipierbar. Die mangelnde Transparenz über die Abhängigkeiten im Spannungsfeld zwischen der Produktarchitektur, Montage, den Varianten und Lieferanten in der Lieferkette können zu umfangreichen und kostenintensiven Änderungsauswirkungen führen (BEHNCKE et al. 2013a).

Situationsanalyse

Die Situationsanalyse stellt den ersten Schritt der im Kapitel 4 vorgestellten Vorgehensweise dar. Anhand der in der Abbildung 4-2 definierten Merkmale von Analysesituationen und deren möglichen Ausprägungen, wird die Situation im Rahmen des Webasto-Projektes analysiert und festgelegt (siehe Abbildung 5-1). Dabei handelt es sich um ein Serienprodukt, das aufgrund seiner Bauteil-, Funktionsanzahl und Unterschiedlichkeit sowie Verhaltensmöglichkeiten eine mittlere Komplexität²⁶ aufweist. Außerdem ist der Großteil der Bauteile Zukaufteile, die von Webasto zusammen montiert werden. Zudem besitzt die Produktfamilie eine große Anzahl von verkaufsfähigen Produktvarianten, die in der gleichen Montagelinie hergestellt werden.

²⁶ vgl. Stufen der Komplexität nach PROBST & ULRICH (1988)

Aufgrund der Variantenanzahl und der hergestellten Stückzahlen stellt der Montageprozess eine wichtige Betrachtungsdomäne und einen bedeutenden Kostenschwerpunkt für jede Analyse der Produktarchitektur und der Variantenvielfalt dar. Ferner soll auf Basis des vorhandenen Gerätes und dessen Varianten die Produktarchitektur und die bestehende Modularität analysiert werden, um Schwachstellen und Verbesserungspotenzial zu erkennen.

Merkmal	mögliche Ausprägungen		
	Fertigungsart	Einzelfertigung	Serienfertigung
Komplexität	niedrig (Bauteil, Baugruppe)	mittel (Maschine)	hoch (Anlage)
Art der Entwicklungsaufgabe	keine Vorgabe (Neuentwicklung)	Prinzip (Anpassentwicklung)	Entwurf (Variantenentwicklung)
Hauptzielsetzung	Funktion	Kosten	Entwicklungszeit
	Montage/Fertigung	Lieferzeit	etc.
Umfang der Aufgabe	einzelnes Produkt	Produktfamilie / Baureihe	mehrere Produktfamilien / Produktprogramm

Abbildung 5-1: Merkmale der Analysesituation für die Erkennung von Schwachstellen in Produktarchitektur von Wasserheizgeräten

Eine weitere wichtige Perspektive für die Analyse der Produktarchitektur, die im Rahmen des Projektes berücksichtigt wurde, ist die Lieferantenstruktur. Diese Perspektive wird aber im Kontext dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Analyseziel festlegen und Ansatz bestimmen

Nach der Analyse und Festlegung der vorliegenden Situation sollen in diesem Schritt die übergeordneten Analyseziele definiert werden. Nachfolgend können die Ziele mit verschiedenen strategischen Ansätzen für die Produktarchitektur in Verbindung gebracht werden und auf diese Weise konkretisiert werden. Im Kapitel 4.2 wird eine Übersicht über verschiedene mögliche Zielsetzungen von Analyseprojekten gegeben.

Auf Basis der festgelegten Situation soll also die Produktarchitektur unter Berücksichtigung des Montageprozesses analysiert werden. Dabei sind einerseits die Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Spannungsfeld zwischen der Produktarchitektur und Montage hervorzuheben, um Transparenz zu schaffen und kritische Stellen zu erkennen. Andererseits ist die aktuelle Produktarchitektur in Bezug auf die Variantengenerierung im Montageprozess zu untersuchen und zu beurteilen. Zusammenfassend können die übergeordneten Ziele wie folgt beschrieben werden:

- A. Untersuchung der aktuellen Produktarchitektur aus der Perspektive des Montageprozesses und Beurteilung der aktuell verwendeten Module
- B. Untersuchung und Optimierung der Variantengenerierung im Montageprozess

Diese übergeordneten Ziele können mit unterschiedlichen Ansätzen für die Produktarchitektur erreicht werden (siehe auch Abbildung 4-3). Eine Baukasten- oder Plattformstrategie, die die

besonderen Anforderungen der Montage nicht unberücksichtigt lässt, stellt eine Möglichkeit dar, um die Variantengenerierung zu optimieren. Dennoch lässt sich der größtmögliche Nutzen aus einem Baukasten dann erreichen, wenn der Baukasten möglichst viele Produktfamilien oder das gesamte Produktprogramm integriert. Im Rahmen des Projektes „Optimierung von Produktarchitekturen“ wird die Produktarchitektur eines einzelnen Produktes in Bezug auf kritische Stellen und Modularität betrachtet. Aufgrund des relativ kleinen Umfangs der Analyse erweist sich also die Verfolgung einer Baukastenstrategie als überflüssig. Im Gegensatz ist die Entwicklung und Definition einer Produktarchitektur mit geeigneter Modularität praktisch und zielführend, und wird im Rahmen dieses Projektes als Ansatz für die Produktarchitektur verfolgt. Außerdem ist die Entwicklung einer **modularen Produktarchitektur** eine Voraussetzung für eine eventuelle nachfolgende Verfolgung einer produktfamilienübergreifenden Baukastenstrategie. Darüber hinaus bietet die **Standardisierung** innerhalb einer modularen Produktarchitektur eine erweiterte Möglichkeit, um die Komplexität und Variantenvielfalt im Montageprozess zu reduzieren. Dabei soll der aktuelle Standardisierungsgrad untersucht werden und Verbesserungspotenzial bezüglich der Verwendung von Gleich- und Wiederholbauteil erkannt werden.

Analyse abgrenzen

Die Produktvarianten des betrachteten Grundgerätes weisen eine sehr ähnliche Baustruktur auf. Aufgrund dessen ist es trotz der Varianz möglich, die Analyse und Modularisierung auf eine konkrete Ebene durchzuführen. Deswegen wird in diesem Fall die Produktarchitektur auf der **physischen Bauteilebene** untersucht. Dabei werden zwei Abhängigkeitsarten zwischen den Bauteilen erfasst. Einerseits wird die **geometrische Kontaktbedingung** zwischen den Komponenten berücksichtigt. Andererseits werden die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten modelliert, die **bauraumtechnische Abhängigkeiten** schildern. Bauraumtechnische Abhängigkeiten können zum Beispiel Toleranzen zwischen Bauteilen sein, die eingehalten werden müssen. Dabei ist es nicht zwingend erforderlich, dass diese Bauteile auch sogenannte Fügepartner sind, also eine geometrische Kontaktbedingung besitzen. Auf diese Weise ist das Modell der Produktstruktur vollständiger und die Fortpflanzung von Änderungen in der Struktur kann dadurch genauer untersucht. Ferner werden die Bauteile in **Konstruktionselemente** detailliert, die entweder varianten-, fertigungs- oder funktionsbedingt sind, um die Variantenvielfalt mit berücksichtigen zu können. Auf dieser Ebene können dann die Unterschiede zwischen den Bauteilvarianten identifiziert werden und die Standardisierung kann auf diese Detaillierungsebene angewendet werden.

Die Produktarchitektur soll schließlich nicht nur aus **physischer** und **bauraumtechnischer Perspektive** auf Verbesserungspotenzial untersucht werden, sondern auch aus der Sicht des **Montageprozesses**, der den Kostenschwerpunkt darstellt. Aufgrund dessen wird der Montageprozess des Gerätes erfasst und modelliert, und hinsichtlich der aktuellen Modularität beurteilt.

Methoden auswählen und Methodik entwickeln

Für die übersichtliche Modellierung und Analyse der Produktstruktur auf der Bauteilebene wird als Methode die **Design Structure Matrix** (DSM) ausgewählt. Mittels der DSM kann die

physische Produktstruktur des Wasserheizgerätes analysiert werden. Dabei kann die Modularität der aktuellen Produktstruktur mittels *clustering* und des **Vernetzungsgrades** untersucht und beurteilt werden.

Für die Modellierung eines Montageprozesses stellt sich die Aufstellung von sogenannten **Montagevorranggraphen** (REINHART et al. 2000a) als praktisch und zielführend heraus. Damit kann auch leicht die Modularität des Prozesses und des zu montierenden Produktes erkannt werden. Die Module in dieser Struktur können mit der Anwendung der Heuristiken, die auch von der Methode *function heuristics* (s. auch Kap. 3.2.1) benutzt werden, identifiziert werden. Im Kontext dieser Fallstudie hat sich die Heuristik *branching flow* für die Modularisierung des Montagevorranggraphen als zielführend erwiesen und wird für die Erkennung von Modulen angewendet. Die dabei erkannten Module sind im Anschluss mit den Modulen aus der Analyse der physischen Produktstruktur abzugleichen und abzustimmen. Ziel dabei ist die Definition einer Produktmodularität, die sowohl die geometrischen Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen berücksichtigt als auch auf den Montageprozess abgestimmt ist.

Dennoch kann der Graph bei Montageprozessen mit einer großen Anzahl an Montageschritten unübersichtlich werden. In solchen Fällen kann der Prozess mittels matrixbasierter Methoden modelliert und nachfolgend analysiert werden. Außerdem bittet die Anwendung matrixbasierter Methoden bei komplexen Prozessen eine Möglichkeit für die automatisierte Ableitung indirekter Abhängigkeiten in der Produktstruktur. Dabei werden mit Hilfe einer **Domain Mapping Matrix** (DMM) die einzelnen Montageschritte in Verbindung mit den physischen Komponenten gebracht und indirekte Abhängigkeiten in der Produktstruktur abgeleitet. Das Ergebnis ist eine neue abgeleitete Komponenten-DSM aus der Perspektive des Montageprozesses, die im Anschluss modularisiert werden kann. Wie im obigen Abschnitt beschrieben, werden die identifizierten Module mit den Ergebnissen der Modularisierung der erfassten Komponenten-DSM verglichen und abgestimmt.

Schließlich wurde im Rahmen des Projektes der **Variantenbaum** und die in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Verhältnisse angewendet, um den aktuellen Stand der Variantengenerierung im Montageprozess zu beurteilen.

Zusammenfassend besteht die aufgestellte Methodik aus folgenden Schritten:

1. Produktanalyse und Beurteilung der aktuellen Module auf der physischen Bauteilebene
2. Detaillierung der Betrachtung der Bauteile und Ermittlung deren Konstruktionselemente
3. Erkennung vom Standardisierungspotenzial
4. Prozessanalyse und Erkennung von Modulen im Montageprozess
5. Abgleich mit den aktuellen physischen Modulen
6. Untersuchung der Variantengenerierung im Montageprozess

Nachfolgende Abbildung 5-2 zeigt eine schematische Darstellung des Metamodells mit den relevanten Domänen dieser Analyse. Wie in der Situationsanalyse erwähnt, stellt neben dem Montageprozess ebenfalls die Lieferantenstruktur einen wesentlichen Einflussfaktor für die Produktarchitektur und Komplexitätsschwerpunkt dar. Eine nähere Betrachtung und Analyse aus der Perspektive der Lieferantenstruktur findet man in der Arbeit von BEHNCKE (2015).

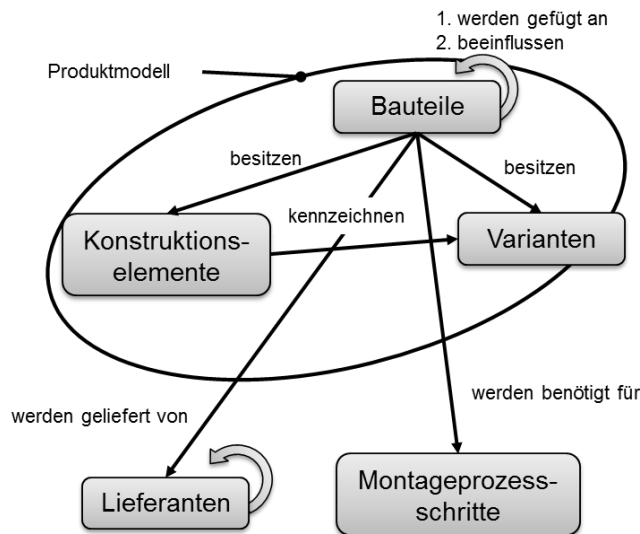


Abbildung 5-2: Metamodell der betrachteten Domänen

Analyse durchführen

Wie auch im Kapitel 4.5 beschrieben wird, findet nach der Planung des Analyseprojektes die eigentliche Analyse statt. Auch im Rahmen dieser Fallstudie wurde das allgemeine Vorgehen zur Durchführung der Analyse auf operativer Arbeitsebene angewendet (siehe Abbildung 4-6). Auf diese Weise wurde zur Erfassung des IST-Standes der physischen Produktarchitektur die DSM als Modellierungsmethode und als Leitfaden für die Informationsakquise herangezogen. Die Informationen zu den Abhängigkeiten zwischen den physischen Komponenten des Wasserheizgerätes wurden sowohl aus dokumentierten expliziten Informationen als auch aus dem impliziten Wissen von Experten akquiriert. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden zwei Arten von Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen erfasst. Dabei existierten die Informationen bezüglich der geometrischen Bauraumabhängigkeiten zwischen den Bauteilen implizit in der Organisation und wurden im Rahmen von strukturierten Experteninterviews und Workshops akquiriert. Die explizit dokumentierten Informationen zu den Fügebeziehungen zwischen den Bauteilen wurden im Rahmen dieser Workshops überprüft. Für die Anwendung der DSM-Methode wurde das SW-Tool Loomeo der Firma Teseon benutzt, das auch die Strukturanalyse hinsichtlich kritischer Stellen, Modularität, etc. unterstützt. Nachfolgende Abbildung 5-3 zeigt die Produktstruktur des Wasserheizgerätes bestehend aus insgesamt 34 Bauteilen. Beide Abhängigkeitsarten zwischen den Bauteilen werden mit einem „X“ in der Matrix dokumentiert.

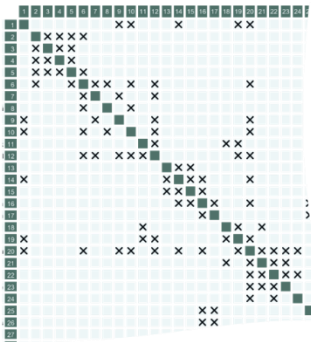


Abbildung 5-3: Ausschnitt der Bauteil-DSM des Wasserheizgerätes

Nach der Erfassung des IST-Standes der physischen Produktstruktur erfolgt im nächsten Schritt die Analyse und Beurteilung anhand der Kriterien und der Zielsetzung, die in den ersten Schritten des Vorgehens festgelegt wurden. In diesem Fall soll die Modularität der Produktarchitektur untersucht werden. Aufgrund dessen wird die clustering Methode (siehe auch Kap. 3.2.1) angewendet, um die aktuell existierenden Module in der Baustruktur zu identifizieren. Das SW-Tool Looemo der Firma Teseon bietet dabei die Möglichkeit, das *clustering* sowohl automatisiert als auch manuell durch die Verschiebung der Matrixelemente auszuführen. Das Ergebnis dieser Modularisierung wird in der Abbildung 5-4 veranschaulicht. Dabei werden insgesamt 5 physische Module identifiziert, die auch nach einer Plausibilitätsanalyse mit Experten den tatsächlichen Baugruppen des Gerätes entsprechen. Dennoch gilt es im nächsten Schritt, die Qualität dieser Module zu analysieren und zu beurteilen. Wie bereits im Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde, existiert eine Vielzahl an Möglichkeiten und verschiedenen Kennzahlen, um *cluster* in einer Struktur hinsichtlich ihrer Qualität zu beurteilen. Im Rahmen dieser Fallstudie soll der Vernetzungsgrad zur Anwendung kommen. Dabei soll ein Modul einen möglichst hohen internen bei gleichzeitig einem möglichst geringen externen Vernetzungsgrad aufweisen.

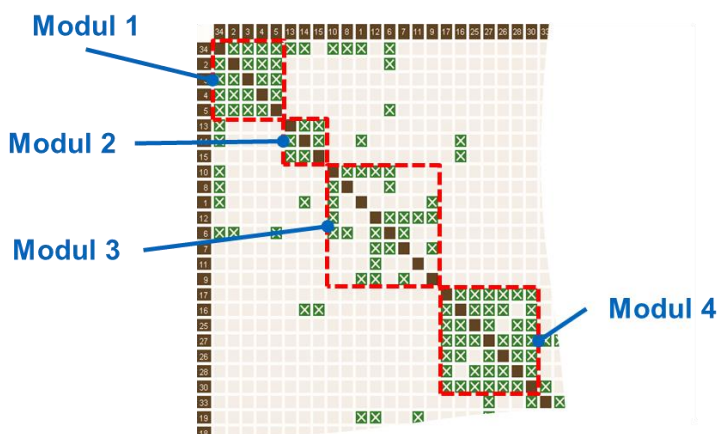


Abbildung 5-4: Ausschnitt aus den identifizierten Modulen in der Produktstruktur durch clustering der Bauteil-DSM

Um den Vergleich der verschiedenen Module zu erleichtern, wird folgendes Verhältnis Q angewendet (BEHNCKE et al. 2013a):

$$Q = \frac{\text{interner Vernetzungsgrad}}{\text{externer Vernetzungsgrad}}$$

Je größer dabei das Verhältnis Q ist, desto höher ist die Qualität des Moduls. Abbildung 5-5 zeigt die Ergebnisse der Berechnung des Vernetzungsgrades und der Qualität der 5 Module in der Struktur des Wasserheizgerätes.

	interner Vernetzungsgrad	externer Vernetzungsgrad	Q
Modul 1	1	0,06	16,1
Modul 2	1	0,06	15,5
Modul 3	0,43	0,09	4,7
Modul 4	0,90	0,07	13,2
Modul 5	0,36	0,11	3,3

Abbildung 5-5: Berechnung der Qualität der identifizierten Module

Es wird ersichtlich, dass die Module 1, 2 und 4 eine sehr hohe Qualität hinsichtlich der physischen Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen aufweisen. Dagegen besitzen die Module 3 und 5 einen relativ niedrigen internen Vernetzungsgrad bei einem gleichzeitig höheren Zusammenspiel mit den restlichen Modulen. Grund dafür ist die hohe Anzahl an Wechselwirkungen und folglich Kritikalität der Bauteile 20 und 34, die eine große Anzahl von Schnittstellen mit dem restlichen System besitzen.

Nachfolgend soll der Montageprozess des betrachteten Produktes erfasst und mittels eines Montagevorranggraphes modelliert werden. Wie in den obigen Abschnitten festgelegt wurde, ist das Ziel eine optimale Abstimmung zwischen Montageprozess und Produktstruktur durch eine geeignete Modularisierung des Produktes. Abbildung 5-6 zeigt eine schematische Darstellung des erfassten Montageprozesses.

Der Montageprozess des Wasserheizgerätes und seiner Varianten besteht aus 12 Hauptprozessschritten. Dies entspricht eine Betrachtung des Montageprozesses auf einem groben Niveau, denn jedes dieser Hauptprozessschritte kann in weiteren elementaren Prozessschritten detailliert werden. Dennoch ist im Rahmen dieser Fallstudie die Betrachtung des Montageprozesses auf einer groben Ebene zur Untersuchung der Modularität ausreichend.

Während der 12 groben Montagevorgänge werden Zwischenerzeugnisse produziert, die beim nächsten Montageschritt mit weiteren Bauteilen und/oder Zwischenerzeugnissen in einer größeren Montagebaugruppe zusammenmontiert werden. Um zu untersuchen, ob diese Montagebaugruppen die aus der physischen Perspektive identifizierten Modulen entsprechen, wird auf Basis des Montagevorranggraphes mittels der Heuristik *branching flow* die Struktur modularisiert. Das Ergebnis ist die Identifikation von 6 Modulen aus der Perspektive des Montageprozesses (siehe auch Abbildung 5-7). Zwei davon entsprechen genau den Modulen 1 und 2, die auch bei der Analyse der physischen Produktstruktur identifiziert wurden. Dem Modul 3 können aus der Perspektive des Montageprozesses zwei Bauteile weniger zugeordnet

werden. Dennoch gibt es bei diesem Modul keine Überschneidungen mit anderen Modulen, wie es beim Modul 5 und Modul 4 der Fall ist. Dem Modul 5 können ebenfalls zwei Bauteile weniger zugeordnet werden, die aber zu einer anderen Montagebaugruppe gehören. Diese Montagebaugruppe wird unabhängig vom Modul 5 montiert und besteht aus nur zwei Bauteilen. Ähnlich kann dem Modul 4 ein Bauteil weniger zugeordnet werden als bei der Modularisierung aus physischen Perspektive (siehe Abbildung 5-7).

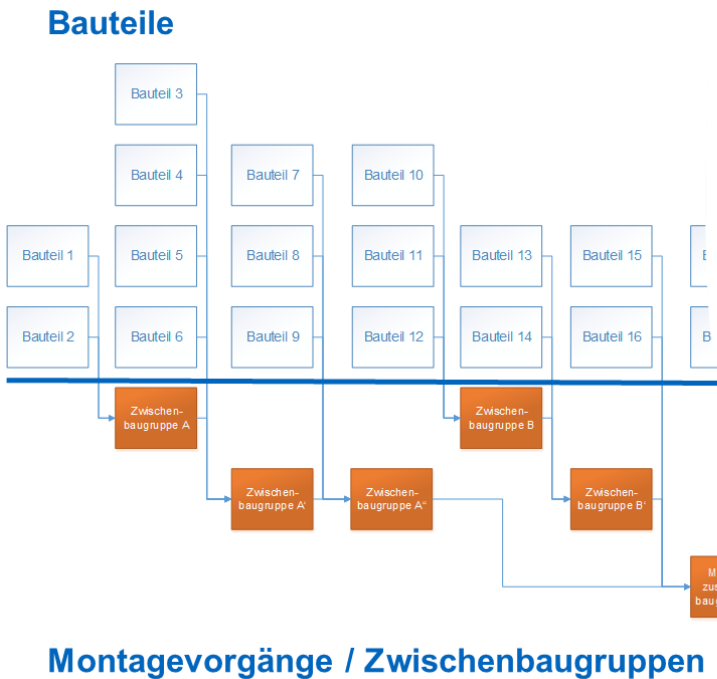


Abbildung 5-6: Ausschnitt vom Montagevorranggraph des Wasserheizgerätes

Interessant anzumerken ist, dass die Module, die eine hohe Qualität aufweisen (siehe Abbildung 5-5), auch größtenteils den Modulen aus der Perspektive des Montageprozesses entsprechen. Folglich ist die Erhöhung der Qualität der Module 3 und 5 in der physischen Produktstruktur als SOLL-Zustand definiert.

Die konstruktiven Verbesserungsvorschläge können konkreter wie folgt beschrieben werden. Beim Modul 3 sollen die Bauteile 15 und 16, die im IST-Stand als einzelne Bauteile für die Vervollständigung der Montagezusammenbaugruppe AB montiert werden, in das Modul 3 integriert werden. Was auch die Eliminierung von einem Hauptprozessschritt des Montageprozesses zur Folge haben wird.

Ferner, sollen die weiteren konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen auf die kritischen Bauteile 33, 34 und 20 konzentriert werden, um in der Montage sowie bei den Herstellkosten einen möglichst hohen Nutzen durch Modularität und Parallelisierung von Prozessschritten erzielen zu können. Dabei sollen die Bauteile 34 und 35 in den Montagevorgang des Moduls 5 integriert werden. Dafür sind die physischen Abhängigkeiten dieser Bauteile mit Bauteilen anderer Module zu eliminieren. Zudem sollen die Schnittstellen des Bauteils 20 außerhalb des Moduls

5 reduziert werden. Dadurch kann eine eindeutige höhere Qualität erreicht werden und der Montageprozess um einen Hauptprozessschritt reduziert werden. Schließlich soll das Bauteil 33 als ein neues sechstes Modul definiert werden, dass am Ende des Montageprozesses angebracht wird.

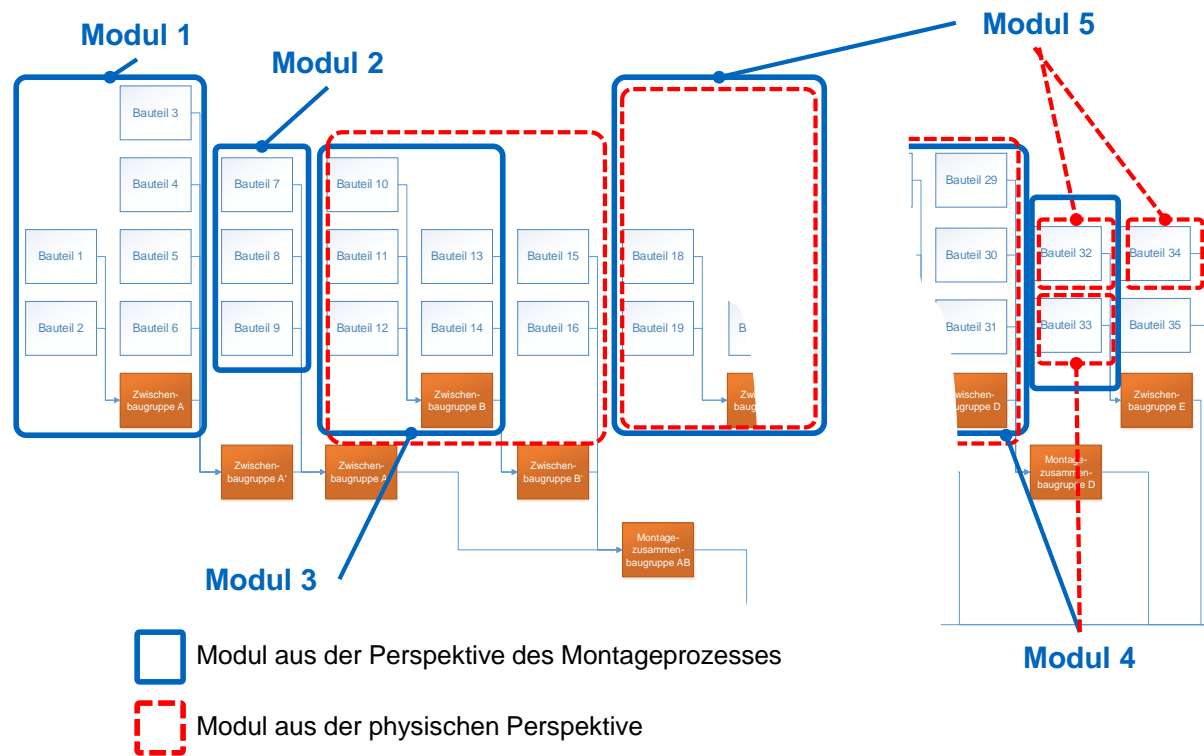


Abbildung 5-7: Veranschaulichung der Ergebnisse der Modularisierung aus zwei verschiedenen Perspektiven anhand des Montagevorranggraphs

Diese Verbesserungsempfehlungen können auch mittels der DSM der Produktstruktur dokumentiert werden. Dabei sind die Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen anhand des angestrebten SOLL-Zustandes anzupassen, so dass auch die Kennzahlen des SOLL-Zustandes ermittelt werden können.

Nach der Analyse des Grundgerätes bezüglich Modularität kann im nächsten Schritt die Analyse der Variantengenerierung im Montageprozess angegangen werden. Da die Variantenvielfalt erst auf einem detaillierten Niveau und nicht auf der Ebene der physischen Bauteile zu erkennen ist, sind die einzelnen Konstruktionsmerkmale (oft auch als Unterscheidungsmerkmale bezeichnet) der Bauteile zu erfassen. Auf dieser Detaillierungsebene können dann die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Bauteilvarianten erkannt werden. Im Rahmen des Projektes „Optimierung von Produktarchitekturen“ wurden auf diese Weise mehr als 160 Konstruktionsmerkmale von Bauteilen identifiziert und erfasst.

Im Kontext dieser Arbeit wird das Modul 2 als Beispiel zur Durchführung dieser Analyse dienen. Um den aktuellen Stand analysieren zu können, wird der Variantenbaum des Moduls

aufgestellt, der auch den Montageprozess des Moduls abbildet (siehe Abbildung 5-8). Wie im Kapitel 3.2.2 beschrieben wird, wird dabei die Variantenvielfalt im Zusammenhang mit dem Montageprozess dargestellt und das Ziel ist die Realisierung der geförderten externen Variantenvielfalt in einem möglichst späten Montageschritt mit einer möglichst niedrigen internen Varianz (siehe auch Abbildung 3-15).

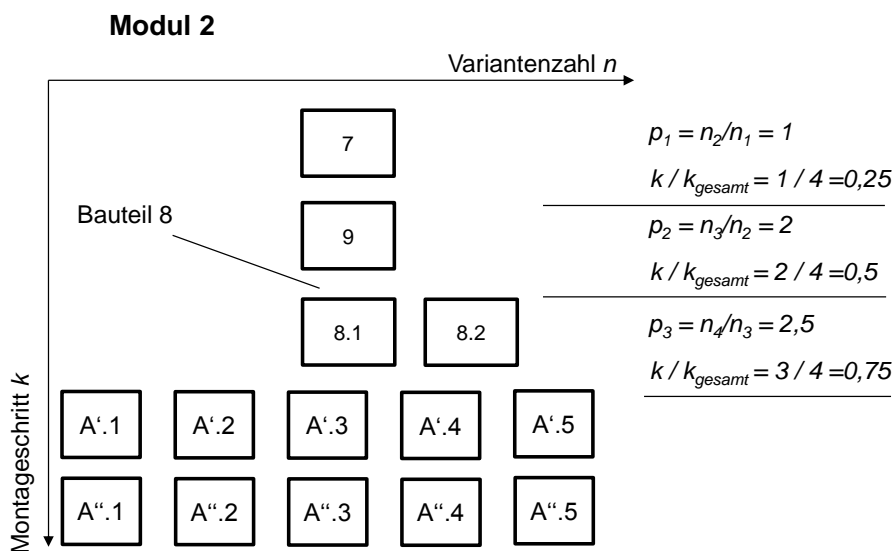


Abbildung 5-8: Variantenbaum der Moduls 2

Im Fall des Moduls 2 fängt dieser Standardisierungsprozess von Bauteilen an dem Diversifikationspunkt $p_2 = n_3/n_2 = 2$ an. Nach einer näheren Betrachtung des entsprechenden Bauteils („Bauteil 8“) stellt sich fest, dass die Varianz von einem Konstruktionsmerkmal des Bauteils hervorgerufen wird. Der Grund der Varianz und der Variantentreiber dabei ist die Kraftstoffart. Folglich konzentriert sich der weitere konstruktive Verlauf des Standardisierungsprozesses, der im Rahmen dieser Arbeit nicht näher angegangen wird, auf das entsprechende Konstruktionsmerkmal. Nach einer eventuellen Standardisierung des Bauteils würde sich das Verhältnis p reduzieren und der Diversifikationspunkt V in einem späteren Montageschritt $k/k_{\text{gesamt}} \rightarrow 1$ verschieben. Dieser Ablauf kann dann am neuen Diversifikationspunkt $V p_3 = n_4/n_3 = 5$ wiederholt werden.

5.2 Fallstudie 2: Neuentwicklung einer Produktfamilie von Hochvolt-Aluminiumsteckern

Kurzvorstellung des LEIKO HV-Aluminiumsteckers

Elektromobilität zur Reduktion verkehrsbedingter CO₂- und Schadstoffemissionen ist heute und sicher auch zukünftig ein zentrales Thema in der Politik und Wirtschaft. Ziel des von der Bayerischen Forschungsförderung (BFS) geförderten Projektes „Leiter und Kontaktierung“ ist die Untersuchung und Entwicklung eines geeigneten Konzeptes zur Substitution von Kupfer

durch Aluminium als Material für das Hochvolt-Bordnetz zukünftiger Elektrofahrzeuge. Durch Aluminium werden zwar Kosten und Gewicht reduziert, allerdings ergeben sich nach derzeitigem Stand der Technik vollkommen neue Fragestellungen hinsichtlich der Kontaktierung, der Korrosion und des Alterungsverhaltens. Eine weitere Anforderung an das neue Konzept ist die Definition einer geeigneten Architektur für die benötigten Varianten des HV-Steckers. Das konstruktive Vorgehen des Projektes kann dabei wie folgt zusammengefasst werden (DANILIDIS et al. 2012c).

Im Rahmen des von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderten Projektes „LEIKO“ werden anfangs die Entwicklungs- und Optimierungsziele geklärt und definiert und eine Anforderungsliste erstellt. Im Anschluss wird das Konstruktionsproblem mit Hilfe einer Funktionsanalyse strukturiert und in Teilprobleme/-aufgaben aufgeteilt, die leichter zu handhaben sind. Der Phase der kreativen Generierung von Lösungsalternativen folgt dann eine konkrete konstruktive Umsetzung. Außerdem werden parallel zu der Entwicklung die Thematik eines möglichst hohen Standardisierungsgrades und einer modularen Produktarchitektur für die Varianten des Steckers untersucht und verfolgt.

Funktionsanalyse und Konzeptentwicklung des HV-Aluminiumsteckers

Bei einer Neuproduktentwicklung stellt die Funktionsanalyse und –modellierung einen bedeutenden Schritt für die nachfolgende Generierung von Lösungsideen dar. Anhand der Funktionsanalyse kann die Entwicklungsaufgabe in Teilaufgaben, die leichter gehandhabt werden können, unterteilt werden (LINDEMANN 2009). Außerdem können schon auf dieser abstrakten Ebene die ersten Gedanken bezüglich Modularität, Plattformen sowie Standardisierung einfließen, wie es im weiteren Verlauf dieser Fallstudie gezeigt wird. Abbildung 5-9 zeigt das hierarchische Funktionsmodell des zu entwickelten HV-Steckers.

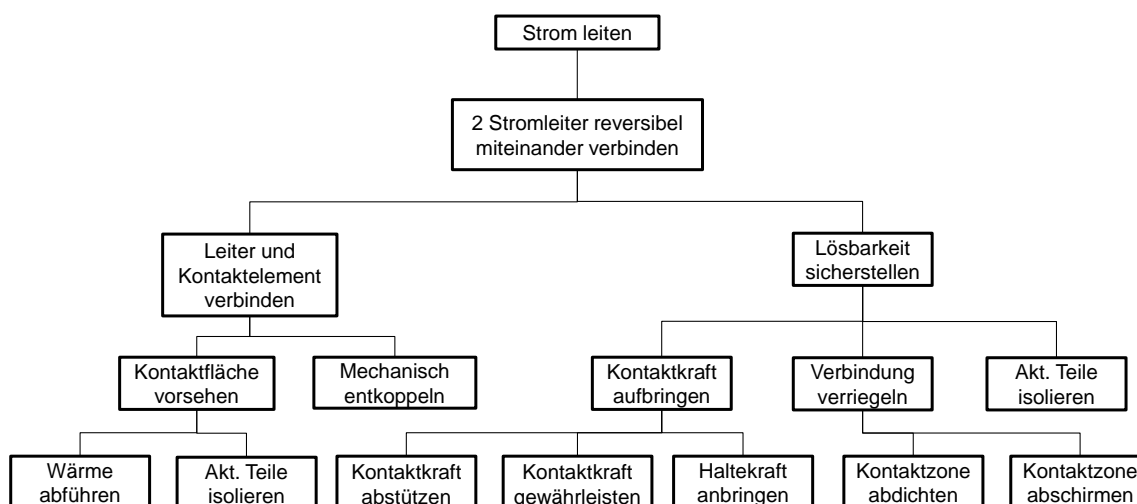


Abbildung 5-9: Hierarchisches Funktionsmodell des HV-Steckers

Ausgehend von der Hauptfunktion des Steckers, zwei Stromleiter reversibel miteinander zu verbinden, werden weitere Funktionen identifiziert, die für die Erfüllung der Hauptfunktion

und der gestellten Anforderungen notwendig sind. Diese elementaren Funktionen sind dann im nächsten Schritt der Entwicklung zu konkretisieren. Dabei wurde in verschiedenen Konkretisierungsschleifen ein Gesamtkonzept für den neuartigen Stecker ausgearbeitet (siehe Abbildung 5-10).

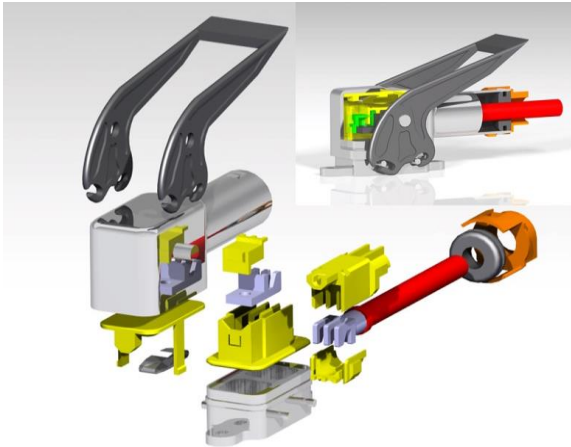


Abbildung 5-10: Explosionszeichnung des im Rahmen des LEIKO Projektes entwickelten HV-Aluminiumsteckers

Situationsanalyse

Bei dieser Neuproduktentwicklung handelt es sich um die Entwicklung einer kleinen Produktfamilie, die die benötigte Varianz an Stecker für ein Elektrofahrzeug abdeckt. Diese Stecker sind dann in einer Serienfertigung herzustellen, was dem Montage- und Fertigungsprozess eine besondere Rolle verleiht. Aufgrund der relativ geringen Anzahl an Bauteilen, Funktionen und Wechselwirkungen charakterisiert sich das Produkt durch eine geringe Komplexität im Verhältnis zu umfangreicheren Systemen.

Da es sich bei den zu entwickelnden Bauteilen um Zukaufteile handelt wird bei der Analyse des Herstellungsprozesses nur die Montage der unterschiedlichen Bauteile zum fertigen Produkt betrachtet und nicht die einzelnen Fertigungsschritte. Weiterhin bildet bei jeder Neuproduktentwicklung auch die Gewährleistung der Funktionalität eine weitere wichtige Perspektive und Hauptzielsetzung einer Analyse der Produktarchitektur. Abbildung 5-11 zeigt eine Übersicht der Eigenschaften der Analysesituation dieser Fallstudie. Anhand dieser Eigenschaften kann in den nächsten Schritten die genaue Zielsetzung des Vorgehens definiert werden und der zu verfolgende Ansatz bestimmt werden.

Merkmal	mögliche Ausprägungen		
Fertigungsart	Einzelfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
Komplexität	niedrig (Bauteil, Baugruppe)	mittel (Maschine)	hoch (Anlage)
Art der Entwicklungsaufgabe	keine Vorgabe (Neuentwicklung)	Prinzip (Anpassentwicklung)	Entwurf (Variantenentwicklung)
Hauptzielsetzung	Funktion	Kosten	Entwicklungszeit
	Montage/Fertigung	Lieferzeit	etc.
Umfang der Aufgabe	einzelnes Produkt	Produktfamilie / Baureihe	mehrere Produktfamilien / Produktprogramm

Abbildung 5-11: Merkmale der Analysesituation der Produktarchitektur des HV-Aluminiumsteckers

Analyseziel festlegen und Ansatz bestimmen

Anschließend kann die Definition von übergeordneten Analysezielen stattfinden. Aus der Situationsanalyse geht hervor, dass der Montageprozess einen besonderen Schwerpunkt ausmacht. Da es sich um eine Neuproduktentwicklung handelt soll außerdem die Realisierung der Funktionalität des Produktes und seiner Varianten gewährleistet werden. Folglich stellt die Untersuchung der Möglichkeit der Parallelisierung und der Reduktion von Montageschritten ein übergeordnetes Analyseziel dar. Zudem soll die Realisierung einer möglichst späten Variantengenerierung im Montage- und Fertigungsprozess realisiert werden. Um bezüglich Funktionalität und Komplexität eine optimierte Produktarchitektur zu entwickeln, soll auf eine Realisierung der benötigten Varianten durch eine niedrige Variantenvielfalt an Bauteilen geachtet werden.

Dabei können die gesetzten Ziele durch folgende Ansätze verfolgt werden:

- a. Definition einer geeigneten modularen Architektur, um die Parallelisierung von Montageschritten und eine spätere Variantengenerierung zu ermöglichen
- b. Standardisierung, um die interne Variantenvielfalt zu reduzieren

Analyse abgrenzen

Der **Betrachtungsraum** der Analyse bezüglich der Variantenvielfalt wird von den benötigten Steckervarianten gegeben. Dabei handelt es sich um eine Baureihe, bei der die Größe der Kontaktelemente und der Leiter variiert. Dadurch können zwei unterschiedliche Stromleistungen realisiert werden. Zudem werden je nach Phasenanzahl (1 bis 3) insgesamt drei Varianten pro Stromleistung benötigt. Die Gesamtanzahl an Steckervarianten beträgt also sechs Varianten.

Zunächst wird die Produktarchitektur auf der **funktionalen Ebene** analysiert, um potenzielle Module zu identifizieren. Nach der Konkretisierung des Produktdesigns werden die identifizierten Module auf der **physischen Ebene** verifiziert.

Um Standardisierungspotenzial zu erkennen ist das Design - aufgrund der mangelnden Unterschiede auf der funktionalen Ebene – auf den elementaren Ebenen zu untersuchen. Das bedeutet, dass die Gründe für die Varianz auf der **Bauteilebene** zu untersuchen sind. Falls es nicht möglich ist, die genauen Ursprünge der Varianz auf dieser Ebene zu identifizieren, soll die Untersuchung der kritischen Bauteile auf der detaillierteren **Ebene der Konstruktionselemente** stattfinden.

Ferner soll der Montageprozess in Verbindung mit den Produktvarianten in Betracht gezogen werden. Hierfür soll der **Montageprozess** aufgenommen und die Variantengenerierung analysiert werden.

Methoden auswählen und Methodik entwickeln

Wie bei der Abgrenzung der Analyse bereits erwähnt wurde, ist die funktionale Analyse der Produktarchitektur notwendig, um eine geeignete Modularität des Produktes auf einer abstrakten Ebene schon vom Anbeginn der Neuentwicklung zu definieren. Dabei können verschiedene Funktionsmodellierungsmethoden angewendet (LINDEMANN 2009). Im Rahmen dieser Fallstudie hat sich das **hierarchische Funktionsmodell** als effizient erwiesen, um in der Funktionsstruktur des Produktes *cluster* und potentielle Module zu identifizieren. In Kombination mit den im Kapitel 3.2.1 vorgestellten Funktionsheuristiken werden die zwei Äste des hierarchischen Funktionsmodells als potenzielle Module der Produktarchitektur identifiziert (vgl. *branching flow*) und die weitere Entwicklung des Steckers kann mit diesem Ziel vorangetrieben werden. Bei den identifizierten potenziellen Modulen handelt es sich um das Modul der „*Leiterseite*“ mit der Verbindung des Leiters mit dem Kontaktelement (vgl. linken Ast in der Abbildung 5-9) und um das Modul „*Deckel*“, das die Lösbarkeit der Verbindung sicherstellt (vgl. rechten Ast in der Abbildung 5-9).

Aufgrund der relativ geringen Varianz und der gleichen Funktionalität der Produktvarianten auf allen Detaillierungsebenen, stellt sich die weitere Betrachtung der Produktarchitektur auf der Gestaltebene als zielführend dar. Hierfür eignet sich besonders die Analyse der Produktstruktur auf **Komponentenbasis** mittels der *Design Structure Matrix* (DSM), um *cluster* und weitere Strukturmerkmale zu identifizieren (siehe Kapitel 3.2.2). Hierfür kann der **Vernetzungsgrad** in Anwendung kommen, um die auf der funktionalen Ebene identifizierten Module zu verifizieren. Die Abhängigkeiten zwischen den physischen Komponenten, die dabei in der DSM erfasst werden, stellen geometrische Wechselwirkungen dar und werden mit einem „X“ in der Matrix markiert.

Ähnlich müssen die elementaren Ebenen der Detaillierungsdimension untersucht werden, um Standardisierungspotenzial zu erkennen. Dabei soll zuerst der Einfluss der Variantentreiber auf die Bauteile untersucht werden, um im ersten Schritt kritische Bauteile zu identifizieren. In diesem Zusammenhang werden die Bauteile als kritisch betrachtet, die von den meisten Variantentreibern beeinflusst werden und folglich eine große Anzahl von Varianten produzieren. Im nächsten Schritt sollen die genauen Gründe der Variantenvielfalt identifiziert werden. Falls dies auf der Bauteilebene nicht möglich ist, sind die betrachteten Bauteile eine Ebene auf Konstruktionselemente weiter zu detaillieren. Nach der genauen Identifikation der Gründe der Varianz sollen sie möglichst eliminiert werden.

Der **Variantenbaum** weist sich als eine geeignete Methode, um den Montageprozess in Abhängigkeit der internen Varianz der Produktarchitektur zu visualisieren. Dabei können die im Kapitel 3.2.2 vorgestellten Metriken herangezogen werden, um den Diversifikationspunkt V zu beurteilen und einen Soll-Ist-Vergleich der aktuellen mit der optimierten Produktarchitektur durchzuführen. Die **Variantenmatrix** stellt dabei eine alternative Methode zur Visualisierung der Vielfalt und zur Berechnung des Standardisierungsgrades in einer Produktfamilie dar.

Zusammenfassend besteht die aufgestellte Methodik aus folgenden Schritten:

1. Modularisierung auf der Funktionsebene
2. Bestätigung der Modularisierungsergebnisse auf der Bauteilebene
3. Variantenanalyse in Bezug auf den Montageprozess
4. Standardisierungspotenzial erkennen
5. Verbesserungen durchführen
6. Optimierten Zustand beurteilen

Analyse durchführen

Beim ersten Schritt der Analyse soll durch eine Produktanalyse der aktuelle Stand der Produktarchitektur erfasst und analysiert werden. Zudem können in diesem Schritt die auf der Funktionsebene identifizierten Module verifiziert werden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, eignet sich für die Modularisierung die Anwendung einer komponentenbasierten DSM (siehe Abbildung 5-12).

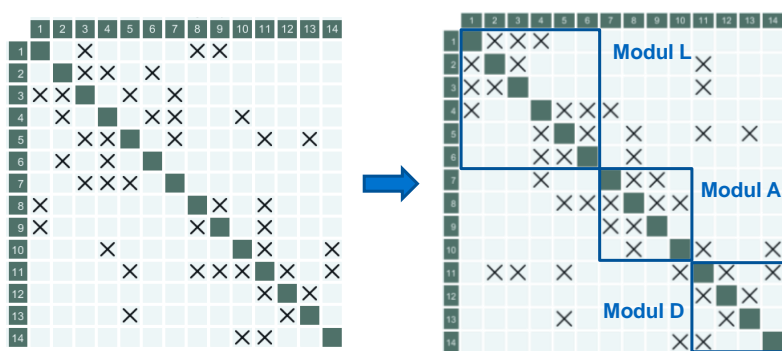


Abbildung 5-12: Komponenten DSM des HV-Steckers vor und nach dem *clustering*

Um potenzielle Module in der physischen Produktstruktur zu identifizieren wird mit Hilfe des SW-Tools *Loomio* ein *clustering* Algorithmus angewendet. Das Ergebnis sind drei potenzielle Module, deren Grenzen mit Hilfe des inneren und äußeren Vernetzungsgrades bestimmt und verifiziert werden können (siehe Abbildung 5-13). Dabei gilt, einen möglichst hohen Vernetzungsgrad innerhalb des Moduls und einen möglichst niedrigen Vernetzungsgrad außerhalb des Moduls zu realisieren.

Modul	Vernetzungsgrad innerhalb des Moduls	Vernetzungsgrad außerhalb des Moduls
L	47%	15%
D	67%	13%
A	50%	15%

Abbildung 5-13: Vernetzungsgrade der identifizierten Module

Anders als bei der Modularisierung auf der Funktionsebene können hier drei statt zwei Module identifiziert werden. Das liegt daran, dass das hierarchische Funktionsmodell (Abbildung 5-9) die Funktionalität der einen Leiterseite angibt. Tatsächlich entsprechen die Module L (Leiterseite) und D (Deckel) den Modulen, die auch auf Basis des Funktionsmodells identifiziert werden konnten.

Bei der Variantenanalyse werden zunächst die benötigten Bauteilvarianten festgelegt, um die definierte externe Varianz zu realisieren. Dafür muss in diesem Schritt der Einfluss der Variantentreiber (Stromstärke, Phasenanzahl) auf die Bauteile untersucht werden. Im Rahmen dieser Fallstudie wird deswegen eine *domain mapping matrix* (DMM) angewendet (siehe Abbildung 5-14). Übersichtshalber werden in der Matrix sowohl die direkten als auch die indirekten Abhängigkeiten zwischen den Variantentreibern und Bauteilen gezeigt. Dabei hat beispielsweise die Stromstärke bzw. der Stromfluss einen direkten Einfluss auf die Kontaktelemente und auf dem Querschnitt des Kabels. Da aber die Kontaktelemente und das Kabel mit weiteren Bauteilen geometrisch vernetzt sind, sind durch diesen Variantentreiber weitere Bauteile betroffen.

kritisches Bauteil

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Kabel	Kontakt AS	Kontakt LS	Isolierung AS	Isolierung LS	Berührschutz AS	Berührschutz LS	Gummidichtung	Schnappdeckel	Bodenelement	Deckel	Federaufnahme	Feder	Hebel
Phasenanzahl	1			X						X	X	X		X
Stromfluss	2	X	X	X	X	X	X	X	X					

Abbildung 5-14: direkte und indirekte Abhängigkeiten zwischen Variantentreibern und Bauteilen

Die aufgrund der Variantentreiber benötigten Bauteilvarianten werden in einer Stückliste festgehalten. Die Artikelnummer der Bauteilvarianten sind dabei so gewählt, dass sie einen direkten Aufschluss über die Zugehörigkeit des Bauteils geben (siehe Abbildung 5-15).

Artikelnr.	Bezeichnung/Funktion	Variantentreiber abhängig von (x) und (y)	Varianten
1.y.x	Kabel	Kabelquerschnitt 0	1.0.1 1.0.2
2.y.x	Schnappdeckel	Kabelquerschnitt 0	2.0.1 2.0.2
3.y.x	Gummidichtung	Kabelquerschnitt 0	3.0.1 3.0.2
4.y.x	Kontakt AS	Kabelquerschnitt 0	4.0.1 4.0.2
5.y.x	Kontakt LS	Kabelquerschnitt 0	5.0.1 5.0.2
6.y.x	Isolierkörper AS	Kabelquerschnitt Phasenanzahl	6.1.1 6.1.2 6.2.1 6.2.2

...

Abbildung 5-15: Ausschnitt der Stückliste des HV-Steckers

Im Folgenden wird der Einfluss der beiden Variantentreiber auf das Bauteil „Isolierung Aggregatseite“, das aufgrund der Abhängigkeit mit den beiden Variantentreibern als kritisch eingestuft wird, näher untersucht. Die Kritikalität des Bauteils bezüglich der Variantenvielfalt beruht sich darauf, dass von diesem Bauteil eine hohe Variantenvielfalt erforderlich ist, die anschließend in weitere Bauteile propagiert. Eine Standardisierung dieses Bauteils hätte also die Reduktion der Varianz mehrerer weiterer Bauteile als Folge. Um diesen Soll-Zustand zu erreichen, müssen die elementaren Konstruktionselemente des Bauteils untersucht werden und ihre Beeinflussung von den Variantentreibern bestimmt werden.

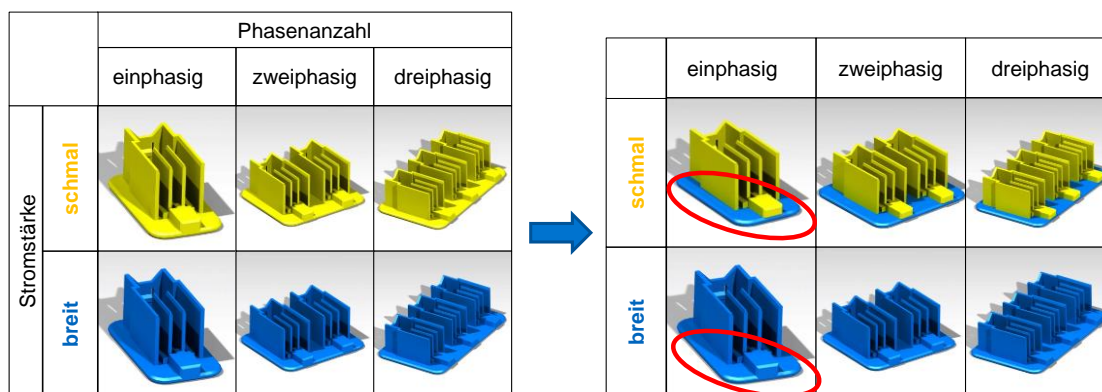


Abbildung 5-16: Übersicht über die Varianten des Bauteils 6.y.x. vor (links) und nach (rechts) der Optimierung. Veranschaulichung der Standardisierung auf der Ebene der Konstruktionselemente (rechts)

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass das untere Teil des Bauteils – die Auflage – für die Fortpflanzung der Varianz in weitere Bauteile – wie z.B. Deckel, Hebel und Federaufnahme – verantwortlich ist. Die konstruktive Verbesserungsmaßnahme ist nun den oberen Teil des Bauteils – Kontaktelementaufnahme – anhand der Breite des Kontaktelementes zu variieren und die „Auflage“ zu standardisieren (siehe Abbildung 5-16).

		vor der Optimierung			nach der Optimierung		
		p_k	n/k	k/i	p_k	n/k	k/i
Modul A	k1	1,0			0,5		
	k2	1,0	3	0,33	2,0	1,5	0,33
	k3	1,0	2	0,50	1,0	1	0,50
Modul D	k1	6,0			3,0		
	k2	1,0	6	0,5	1,0	3	0,5

Abbildung 5-17: Beurteilung der internen Variantenvielfalt und Variantengenerierung vor und nach der Standardisierung

Dies hätte zwar keine Reduktion der Variantenvielfalt des Bauteils 6.y.x. zur Folge, sondern die Halbierung der benötigten Bauteilvarianten, die mit dem Bauteil 6.y.x. eine geometrische Abhängigkeit besitzen. Um dies zu veranschaulichen und den optimierten Zustand zu beurteilen, wurden die Variantenbäume des Moduls D vor und nach dieser Standardisierung aufgestellt (siehe Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2). Abbildung 5-17 zeigt auch die Änderung der Verhältnisse (siehe auch Kapitel 3.2.2) hinsichtlich der Variantenvielfalt und Variantengenerierung.

5.3 Fallstudie 3: Standardisierung und Baukastenentwicklung im Produktprogramm von pneumatischen Ventilen

Kurzvorstellung des Projektes

Im Rahmen des Projektes „Methodische Entwicklung von Standards für die Ventiltechnologie“ zwischen dem Lehrstuhl für Produktentwicklung und der Knorr Bremse SfS GmbH wurde das Produktspektrum von pneumatischen Ventilen untersucht, um Möglichkeiten in der Produktarchitektur hinsichtlich Standardisierung und Schaffung von Transparenz zu erkennen.

Das Produktspektrum der Knorr Bremse SfS GmbH zeichnet sich durch eine hohe Varianz der Bauteile bei gleichzeitig geringen Stückzahlen aus. Die wichtigsten Ursachen dafür sind mehrere Unternehmenszukäufe in der Vergangenheit, ein historisch gewachsenes Produktprogramm sowie mehrere verteilte Entwicklungsstandorte. Dies führt zu hohen Aufwendungen und Kosten in Entwicklung, Produktion und Service.

Ziel des Projektes ist die Klärung der notwendigen Anforderungen an pneumatische Ventile für Bremssteuerungssysteme. Zudem sollen die in Produkten verwendeten Technologien standardisiert werden. Dabei gilt es Funktionsbauteile und Baugruppen pneumatischer Geräte zu entwickeln und zu standardisieren (KIRNER et al. 2013).

Situationsanalyse

Wie auch bei den vorherigen Fallstudien stellt der erste Schritt auch bei dieser Fallstudie eine umfassende Situationsanalyse dar. Der Betrachtungsgegenstand dieses Analyseprojektes sind pneumatische Funktionen, die von unterschiedlichen Typen von pneumatischen Ventilen konstruktiv realisiert werden. Diese Funktionen sind Bestandteile von mechatronischen,

elektropneumatischen und pneumatischen Systemen, die für die Bremssteuerung von Schienenfahrzeugen eingesetzt werden. Zudem besitzt jede Funktion eine Vielzahl von alternativen konstruktiven Ausführungen im Produktsortiment von Knorr Bremse SfS GmbH. Der Umfang der Analyse besteht also aus mehreren Produktfamilien und umfasst einen großen Teil des Produktprogramms des Unternehmens. Ferner weisen die betrachteten pneumatischen Ventile aufgrund der Anzahl an unterschiedlichen Bauteilen eine geringe strukturelle Komplexität auf. Die Fertigungsart dieser Ventile zeichnet sich durch geringe Stückzahlen aus und es handelt sich dabei um eine (Klein-)Serienfertigung. Aufgrund der geringen Stückzahlen und der hohen internen Varianz ist es in der Entwicklung und Produktion schwierig, Skaleneffekte zur Kostenreduktion zu erzielen. Folglich ist die Hauptzielsetzung des Analyseprojektes die Systematisierung und Bereinigung des Sortiments. Da aus dem Analyseprojekt keine neuen Ausführungen entstehen sollen, sondern lediglich die vorhandenen systematisiert werden sollen, kann die Komplexität der Entwicklungsaufgabe mit der einer Variantenentwicklung verglichen werden. Abbildung 5-18 gibt eine Übersicht der Analysesituation anhand der definierten Situationsmerkmale.

Merkmal	mögliche Ausprägungen		
	Fertigungsart	Einzelfertigung	Serienfertigung
Komplexität	niedrig (Bauteil, Baugruppe)	mittel (Maschine)	hoch (Anlage)
Art der Entwicklungsaufgabe	keine Vorgabe (Neuentwicklung)	Prinzip (Anpassentwicklung)	Entwurf (Variantenentwicklung)
Hauptzielsetzung	Funktion	Kosten	Entwicklungszeit
	Montage/Fertigung	Lieferzeit	etc.
Umfang der Aufgabe	einzelnes Produkt	Produktfamilie / Baureihe	mehrere Produktfamilien / Produktprogramm

Abbildung 5-18: Situationsanalyse für das Analysevorhaben

Analyseziel festlegen und Ansatz bestimmen

Auf Basis der Hauptzielsetzung und der analysierten Situation im obigen Abschnitt können die Analyseziele in diesem Schritt weiter konkretisiert werden. Die übergeordnete Zielsetzung des Vorhabens ist die Reduktion der Entwicklungszeit / und des -aufwandes sowie die Reduktion von Kosten durch die Erzielung von Skaleneffekten in der Produktion. Um dies zu erreichen, ist eine Reduktion der internen Varianz und der damit verbundenen Komplexität notwendig sowie eine Systematisierung der vorhandenen konstruktiven Lösungen.

Die Standardisierung kann dabei als strategischer Ansatz für die Reduktion von Kosten und der internen Varianz verfolgt werden. Für die Systematisierung der pneumatischen Ventile und die Erzielung reduzierter Entwicklungszeiten muss allerdings ein weiterer strategischer Ansatz ausgewählt werden. Aufgrund des breiten Spektrums der Analyse stellt sich die Aufstellung eines funktionsorientierten Baukastens als zielführend heraus. Wie in den vorherigen Kapiteln schon beschrieben, bilden die Modularisierung und die Festlegung einer geeigneten Modularität in der Produktarchitektur eine Grundvoraussetzung für die Baukastendefinition.

Analyse abgrenzen

In diesem Schritt sollen die relevanten Abstraktions- und Detaillierungsebenen sowie die Perspektiven für die Durchführung der Standardisierung und für die Definition des Baukastens festgelegt werden.

In der Dimension vom Abstrakten zum Konkreten soll der Standardisierungsprozess auf der abstrakten **Funktionsebene** anfangen, um möglichst große Skaleneffekte auf allen Ebenen zu realisieren. Außerdem ist die funktionale Betrachtung aufgrund des Umfangs und der Unterschiedlichkeit des zu untersuchenden Variantenspektrums unabdingbar. Auf dieser Ebene sind durch eine Modularisierung standardisierte Funktionsmodule zu identifizieren und zu definieren (DANIILIDIS et al. 2009). Im Anschluss sind dann den Funktionsmodulen alternative **Konzeptlösungen**, die im Produktprogramm bereits vorhanden sind, zuzuordnen. Die Konzeptlösungen können dann weiter in **konstruktiven Ausführungen** konkretisiert werden. Um im Anschluss auf dieser konkreten Ebene die Standardisierung durchführen zu können, ist in diesem Schritt die Berücksichtigung weiterer Perspektiven, wie zum Beispiel von technischen **Eigenschaften, Stückkosten**, etc., notwendig. Die Standardisierung soll aber nicht nur auf der groben Ebene der konstruktiven Lösungen stattfinden, sondern es sollen auch auf der **detaillierten Ebene** der **einzelnen Bauteile** Standardisierungspotenziale erkannt werden.

Die Dimension vom **Groben ins Detail** soll als Rahmen für den funktionsorientierten Baukasten dienen. Die standardisierten konstruktiven Lösungen aus dem vorherigen Standardisierungsprozess sind dann in den Baukasten einzupflegen (Abbildung 5-19). Der Baukasten soll so aufgebaut sein, dass ausgehend von der übergeordneten pneumatischen Funktion (**grob**) die verschiedenen Zusatzfunktionen (**Detail**) für ein pneumatisches Ventil ausgewählt werden können. Weiterhin soll der Baukasten auf der detailliertesten Ebene auch die bedeutenden **Technologien** für beispielsweise Dichtungen, Fertigungsverfahren, Federn, Elastomere, Oberflächen, etc. integrieren. Auf Basis dieses Rahmenwerks können auf den verschiedenen Ebenen auch die Anforderungen erfasst, strukturiert und priorisiert werden, um einen ganzheitlichen Systemüberblick zu ermöglichen (EBEN et al. 2010). Folgende Abbildung 5-19 zeigt eine schematische Darstellung der relevanten Betrachtungsebenen für die Standardisierung und die Definition von einem Baukastensystem.

Methoden auswählen und Methodik entwickeln

Für die funktionale Betrachtung und Modularisierung des Variantenspektrums, ist im ersten Schritt der Analyse eine **Funktionsanalyse** notwendig. Dazu stehen verschiedene **Funktionsmodellierungsmethoden** zur Verfügung (LINDEMANN 2009). Für die Identifikation von Modulen entlang des kompletten Variantenspektrums wird die Methode von DANIILIDIS et al. (2010) ausgewählt (vgl. Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2). Den identifizierten Funktionsmodulen sind im Anschluss Konzeptlösungen zuzuordnen, die weiter mit ihren unterschiedlichen konstruktiven Lösungen verbunden werden. Auf dieser Detailstufe soll dann eine **Kosten- und Eigenschaftsanalyse** durchgeführt werden, um Standardisierungspotenzial zu erkennen. Für den Baukasten wurde bereits die Dimension vom **Groben ins Detail** als Rahmengerüst ausgewählt. Aus der bereits angewendeten Funktionsanalyse und Modularisierung sind dann die Ebenen sowie einzelne grobe Bausteine des Ventilbaukastens zu definieren. Des Weiteren sind die standardisierten elementaren Bausteine in den Baukasten einzupflegen.

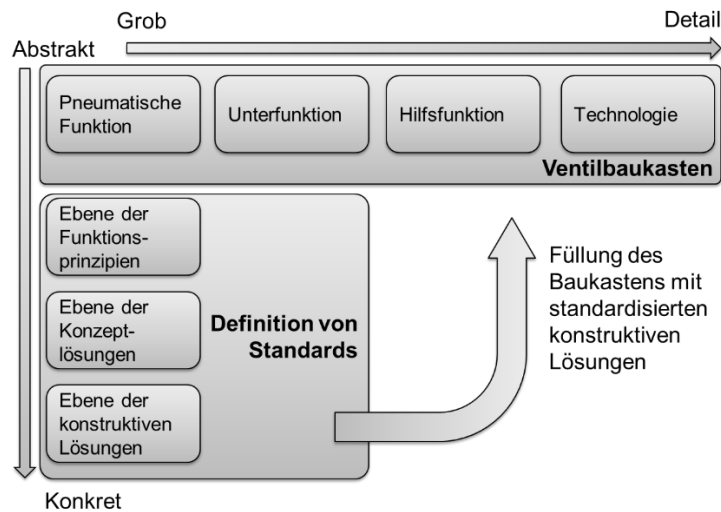


Abbildung 5-19: Metamodell der Betrachtungsebenen der Analyse

Die anzuwendende Methodik besteht aus zwei Hauptschritten. Der erste Schritt stellt das Standardisierungsvorhaben dar und der zweite die Aufstellung des Ventilbaukastens aus den gewonnenen Erkenntnissen während der Funktionsanalyse und Modularisierung (vgl. auch Abbildung 4-5). Anders als bei den beiden vorherigen Fallstudien bewirkt die Standardisierung in diesem Fall eine Änderung der Produktarchitektur auf der betrachteten Detaillierungsebene. Dementsprechend ist der Ansatz der Standardisierung der Baukastenentwicklung vorzulagern.

Analyse durchführen

Der erste Schritt der Analysedurchführung stellt die Erfassung des aktuellen Standes der Produktarchitektur dar. Um alle relevanten Aspekte der Funktionalitäten des Variantenspektrums zu erfassen und um unterschiedliche Sichten auf das Produktportfolio zu ermöglichen, sollen bei der Funktionsanalyse unterschiedliche Modellierungsmethoden eingesetzt werden. Neben einer **hierarchischen Funktionsmodellierung**, sollen auch **umsatzorientierte** und **relationsorientierte** Modelle erzeugt werden (LINDEMANN 2009). Mit der hierarchischen Funktionsmodellierung lassen sich die lösungsneutralen Hauptfunktionen der Ventile erkennen. Darüber hinaus kann es dargestellt werden, welche lösungsbezogenen Unterfunktionen für die Umsetzung der Hauptfunktionen erforderlich sind. In den umsatzorientierten Funktionsmodellen lassen sich insbesondere unterschiedliche Schaltstellungen und Druckzustände, so wie die Anzahl der Schnittstellen der Ventile abbilden. Schließlich wurde die relationsorientierte Funktionsmodellierung genutzt, um Vor- und Nachteile der einzelnen Lösungen gegenüberzustellen. Mit Hilfe von unterschiedlichen Funktionstypen, nützlichen und schädlichen Funktionen, kann veranschaulicht werden, wie sich die Funktionen gegenseitig beeinflussen; beispielsweise, ob eine nützliche Funktion für die Erfüllung einer weiteren erforderlich ist, eine schädliche Funktion verursacht oder eine schädliche Funktion vermeidet.

Die Funktionsmodelle werden im Anschluss systematisiert und gegenübergestellt, um Ähnlichkeiten und Unterschiede erkennen zu können (Abbildung 5-20). Dafür wird für jeden Gerätetyp ein **hierarchisches Referenzmodell** erstellt. Diese Referenzmodelle fassen sämtliche Funktionen eines Gerätetyps, die bei der Analyse der einzelnen Geräte identifiziert wurden, zusammen und bieten eine Übersichtsdarstellung aller Funktionen einer Produktfamilie. Sie spiegeln aber nicht direkt die Funktionsweise eines bestimmten Ventils.

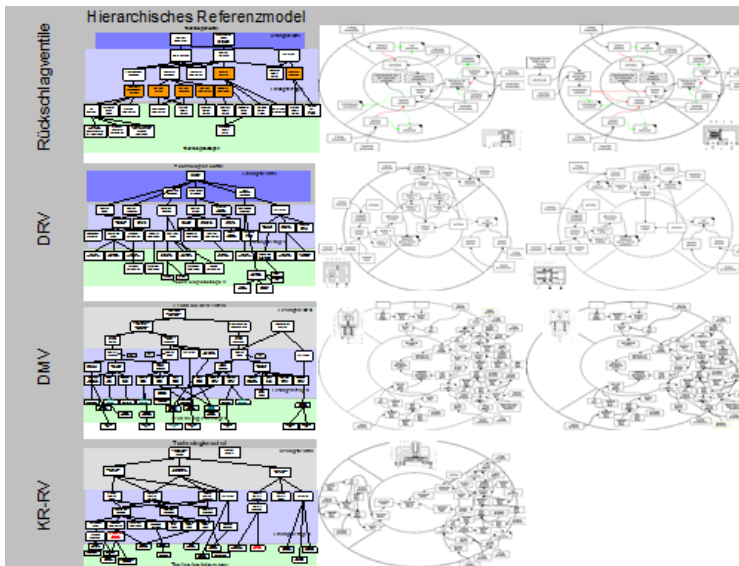


Abbildung 5-20: Ausschnitt der Übersicht und Gegenüberstellung der Funktionsanalyse unterschiedlicher pneumatischer Ventile

Für die Modularisierung und Erkennung von Funktionsmodulen entlang des Produktprogramms, werden die für die Funktionsmodellierungen genutzten Funktionen derart zusammengefasst, dass es sich eine Sammlung aus Standardfunktionen ergibt, womit das komplette Variantenspektrum darstellen lässt (Abbildung 5-21). Mit Anwendung dieser Funktionssammlung können im nächsten Schritt die relationsorientierten Funktionsmodelle der zu betrachteten Ventile einheitlich aufgestellt werden. Diese Modelle lassen sich dann in einer **DSM** überführen, die mittels eines **clustering** Algorithmus modularisiert werden kann.

Ventilsitz V1 öffnen	Ventilkolben bewegen	Aktuelle Stellung erkennen
Ventilsitz V1 schließen	Luftdruck bereitstellen	Mittelstellung vermeiden - undefinierte Position
Ventilsitz V2 öffnen	Federkraft bereitstellen	Luftstrom schalten
Ventilsitz V2 schließen	Schaltkraft (Ventilkolben) bereitstellen	Druck entlüften (Primärleitung = 0)
Ventilsitz V3 öffnen	Regelkraft (Ventilkolben) bereitstellen	Druck mindern
Ventilsitz V3 schließen	Ventilkolben führen	Leitung freischalten
Druck am Ventilteller/-kolben ausgleichen	Luft führen	Leitung sperren
Ventilteller führen	Gehäuse abdichten	Überschneidung verhindern
Ventilteller bewegen	Luft filtern	Ruhestellung gewährleisten
Schaltkraft (Ventilteller) bereitstellen	Führung abdichten	Druck abblasen (0)
Regelkraft (Ventilteller) bereitstellen	Schaltkraft (Ventilkolben) unterbrechen	

Abbildung 5-21: Funktionssammlung zur standardisierten funktionalen Beschreibung von pneumatischen Ventilen

Die im Rahmen dieser Fallstudie und Arbeit entwickelte Methodik zur Erkennung von Funktionsmodulen entlang eines Variantenspektrums von mehreren Produktfamilien wird in der Arbeit von DANIILIDIS et al. (2010) näher beschrieben. Die Modulidentifikation kann auch in diesem Fall mit der Anwendung von geeigneten Metriken unterstützt werden (siehe auch Kap. 5.1 und 5.2).

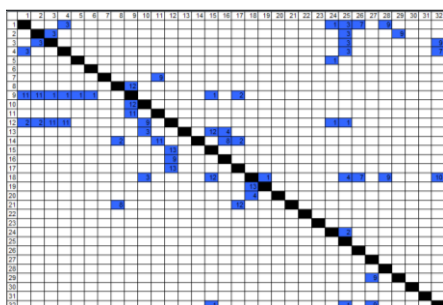


Abbildung 5-22: Identifikation von Funktionsmodulen innerhalb des Produktprogramms mittels clustering einer Funktions-DSM

Das Ergebnis der Funktionsanalyse und der Modularisierung ist die Identifikation von Funktionsmodulen, die in unterschiedlichen Ventilgeräten Verwendung finden. Endergebnis der Funktionsanalyse sind sieben standardisierte Funktionsprinzipien, die für die Abbildung aller im aktuellen Produktportfolio bestehenden pneumatischen Funktionen erforderlich sind (Abbildung 5-23).

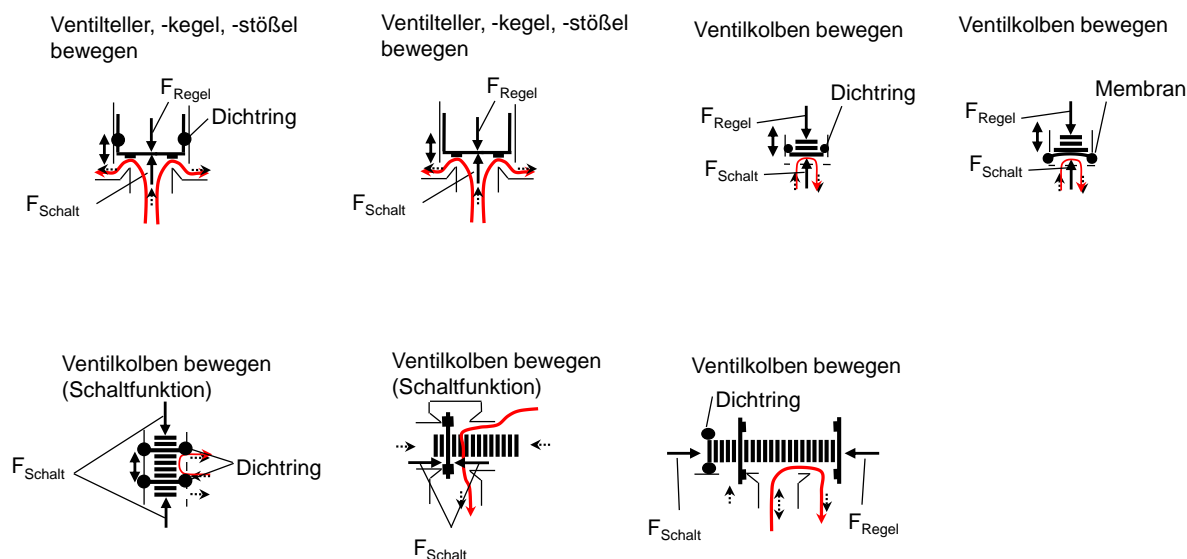


Abbildung 5-23: Abstrakte Funktionsprinzipien abgeleitet aus den identifizierten Funktionsmodulen

Diese sieben Funktionsprinzipien dienen in den weiteren Schritten der Analyse als Basis für die Entwicklung und Systematisierung standardisierter Lösungen. Wobei als nächstes den

sieben Funktionsprinzipien ihre alternativen Konzeptlösungen zugeordnet werden. Im Anschluss werden den Konzeptlösungen die alternativen konstruktiven Ausführungen zugeordnet. Auf dieser Konkretisierungsstufe wird eine Kostenanalyse durchgeführt, um die unterschiedlichen Konstruktionen hinsichtlich Kosten, Stückzahlen, Bauteilanzahl und Komplexität zu beurteilen (Abbildung 5-24).

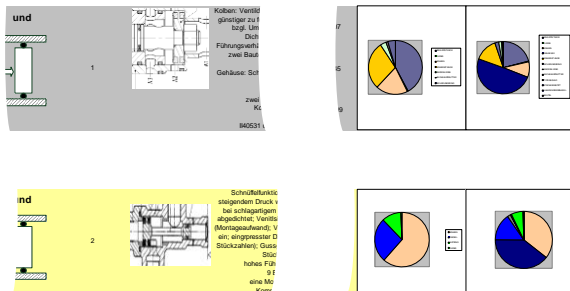


Abbildung 5-24: Ausschnitt aus der Kostenanalyse der im Unternehmen vorhandenen konstruktiven Ausführungen

Die Kostenanalyse ist aber allein für die Durchführung der Standardisierung nicht ausreichend. Dafür müssen Konzepte, Baugruppen und einzelne Bauteile hinsichtlich ihrer charakteristischen Eigenschaften analysiert und gegenübergestellt werden. Die Eigenschaftsanalyse stellt also eine Maßnahme zur Erreichung eines verbesserten SOLL-Zustandes mit einer reduzierten internen Variantenvielfalt dar. Folgende Abbildung 5-25 zeigt ein Beispiel aus der Gegenüberstellung der Varianten eines Dichtelementes. Aus dieser Gegenüberstellung können Varianten identifiziert werden, die ähnliche oder auch identische Eigenschaften besitzen. Unter Berücksichtigung der durchgeführten Kosten- und Stückzahlanalyse kann dadurch eine Eliminierung von überflüssigen Bauteilen sowie die Definition von Standards durchgeführt werden.

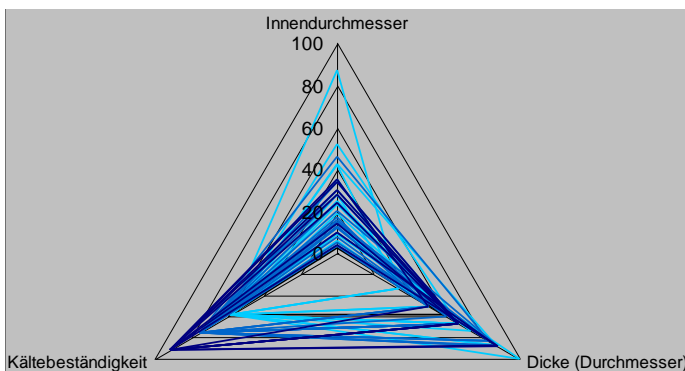


Abbildung 5-25: Beispiel aus der Eigenschaftsanalyse der unterschiedlichen Varianten eines Bauteils

Nach der Durchführung der Standardisierung und der Definition von Standards sowohl auf Bauteil- als auch auf der Konzeptebene und der damit verbundenen Bereinigung des

Produktprogramms von unnötigen Varianten kann das Sortiment und der Entwicklungsprozess mit Hilfe eines Baukastensystems systematisiert und verbessert werden. Außer der Systematisierung und der Schaffung von Transparenz, stellt die Variantenvermeidung bei zukünftigen Entwicklungen ein weiteres wichtiges Ziel dar. Zudem können mit Hilfe des aufgestellten Baukastens weitere Standards auf Produkt- bzw. Geräteebene erreicht werden. Dabei dient der Baukasten als Rahmenwerk für die konstruktive Lösungserzeugung.

Entscheidend für eine erfolgreiche Einführung eines Baukastens ist die Aufstellung einer geeigneten Baukastenstruktur. Im Fall dieser Fallstudie dienten die Ergebnisse der Funktionsanalyse und die identifizierten Funktionsprinzipien als Grundlage für die Struktur des Ventilbaukastens. In mehreren Iterationsschleifen wurde die vorgeschlagene Struktur für den Ventilbaukasten sowie die darin enthaltenen Bausteine in semi-strukturierten Interviews und Workshops mit Mitarbeitern der Knorr Bremse SfS GmbH diskutiert und angepasst. Die resultierende Struktur des Ventilbaukastens enthält vier Detaillierungsebenen (Abbildung 5-26). Auf der obersten Ebene werden standardisierte Umsetzungen für pneumatische Funktionen bereitgestellt, die aus einem definierten Spektrum von Baugruppen und konstruktiven Lösungen der nächsten Detailstufe zusammengesetzt werden können. Die Baugruppen bestehen ihrerseits aus Hilfsfunktionen, die wiederum auf definierten Bauteilen und Technologien aufbauen.



Abbildung 5-26: Ausschnitt aus der Struktur und der Inhalte des Ventilbaukastens

Die ausgewählte Struktur des Ventilbaukastens spiegelt den angewendeten Entwicklungs- und Entscheidungsprozess für pneumatische Ventile wider. Zusätzlich dient sie als Orientierungshilfe für die weitere Füllung des Baukastens mit standardisierten Bausteinen auf allen vier Detailebenen. Für die weitere Füllung des Ventilbaukastens werden sequenziell standardisierte Ventile (z. B. Rückschlagventil) auf der Ebene der pneumatischen Funktionen entwickelt. Dabei entstehen Baugruppen und Bauteile, die als Standard definiert und in den Baukasten aufgenommen werden. Das gleiche gilt für die in diesen Entwicklungen verwendeten Technologien (z. B. Elastomere, Oberflächengestaltung, etc.), die es in Form von Konstruktionsrichtlinien zu dokumentieren gilt. Auf diese Weise wird der Ventilbaukasten sukzessive gefüllt, wobei bei der Entwicklung jeder Ventilfunktion zu prüfen ist, welche Baukastenelemente wiederverwendet werden können (KIRNER et al. 2013).

5.4 Evaluation des Vorgehens und Diskussion der Projektergebnisse

In diesem Abschnitt soll die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise anhand der durchgeführten Fallstudien sowie hinsichtlich des Standes der Forschung und der im Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen kritisch diskutiert und evaluiert werden. Dabei wurden die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse der Fallstudien mit den jeweiligen Industriepartnern in mehreren Interviewrunden kritisch betrachtet und untersucht. Daraus können Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit und Brauchbarkeit der Vorgehensweise gezogen werden.

5.4.1 Diskussion der durchgeführten Fallstudien und Reflexion der Vorgehensweise

Als erstes sollen die Fallstudien für die Diskussion und Reflexion des Vorgehens herangezogen. Schon nach der Durchführung der ersten Fallstudie zur „Analyse und Optimierung der Produktarchitektur von Wasserheizgeräten“ hat sich herausgestellt, dass der Analyseumfang und die Breite des Betrachtungsraums einen direkten Einfluss auf die zu verfolgende Strategie haben. Die gleiche Erkenntnis kann auch aus der dritten Fallstudie zur „Methodischen Entwicklung von Standards für die Ventiltechnologie“, die einen sehr breiten Analyseumfang aufweist, gewonnen werden. Auf diese Weise kann man zu dem Schluss kommen, dass die Verfolgung einer Baukastenstrategie weniger sinnvoll für eine relativ begrenzte Produktfamilie (siehe Kap. 5.1) ist als beispielsweise für das komplette Produktprogramm eines Unternehmens (vgl. Kap. 5.3). Zielführender für ein einzelnes Produkt oder eine kleine Produktfamilie ist dagegen die Analyse und Optimierung hinsichtlich Modularität und Standardisierung mit dem Ziel der Kostenreduktion und der Verbesserung von Durchlaufzeiten in der Herstellung. Zudem stellt die Produktmodularität eine Voraussetzung für eine eventuelle zukünftige Baukastenentwicklung dar.

Aufgrund des hohen Änderungsaufwands und der schwierigeren Anforderungserfüllung erweist sich der strategische Ansatz der Baukasteneinführung eher bei der Betrachtung eines breiten Variantenspektrums aus betriebswirtschaftlicher Hinsicht als sinnvoll. Dabei besteht die Möglichkeit, dass die angestrebten Synergie- und Skaleneffekte in den verschiedenen Unternehmensbereichen höher als der Entwicklungs- und Änderungsaufwand ausfallen (siehe auch Kap. 2.3.2).

Im Kapitel 4.4 wurde bezüglich der Methodikentwicklung beschrieben, dass es sinnvoll ist, eine Standardisierung von Komponenten vor der Analyse einer Produktarchitektur hinsichtlich Plattformen und Modulen durchzuführen (s. Kap. 4.4). Wie es sich allerdings aus den Fallstudien eins und zwei herausgestellt hat, ist diese Reihenfolge irrelevant, wenn die Produktstruktur auf der betrachteten Detaillierungsebene durch die Standardisierung unbeeinflusst bleibt (s. Kap. 5.1 und 5.2). Andererseits wurde aus der dritten Fallstudie ersichtlich, dass ein umfangreiches Standardisierungsvorhaben einer Produktarchitekturanalyse (bspw. Modularisierung, Baukasteneinführung) vorzuziehen ist. Der Grund dafür ist, dass die Produktarchitektur sowohl funktional als auch physisch sich maßgeblich ändert.

Zudem ist das exemplarische Vorgehen zur Durchführung der Analyse (siehe Abbildung 4-6) bei einer Neuproduktentwicklung eher als ein ständiges iteratives Vorgehen als ein starres Muster wahrzunehmen. Dieses wurde in der zweiten Fallstudie zur „Neuentwicklung einer Produktfamilie von Hochvolt-Aluminiumstecker“ eindeutig, als die generierten Lösungen im Laufe des Entwicklungsprozesses weiter konkretisiert werden sollten.

Eine weitere wichtige Erkenntnis nach der Durchführung der dritten Fallstudie zur „Methodischen Entwicklung von Standards für die Ventiltechnologie“ ist, dass die vorgestellte Vorgehensweise den kompletten Analyseumfang abbilden und unterstützen konnte. Dennoch ist es nach der Meinung des Autors effizienter, wenn eine umfangreiche Analyse in Teilvorhaben, die einfacher gehandhabt und geplant werden können, aufgeteilt wird. Am Beispiel dieser Fallstudie könnte zuerst das Standardisierungsvorhaben und im Anschluss die Systematisierung durch die Entwicklung von einem Baukastensystem angegangen werden. Dadurch wären für einen unerfahrenen Produktarchitekten die einzelnen Schritte der Analysedurchführung und Methodikentwicklung besser erkennbar und das gesamte Vorgehen übersichtlicher. Aufgrund des breiten Analyseumfangs gab es außerdem die Schwierigkeit auf dem übergeordneten Anwendungsniveau (bspw. Aufstellung Baukasten) eine geeignete Kennzahl für die Beurteilung des aktuellen Standes und für die Festlegung von einem Soll-Zustand anzuwenden, wie es bei den anderen Fallstudien der Fall war.

Die aus den Projekten erzielten Ergebnisse stellen ebenfalls einen wichtigen Faktor für die Beurteilung des Vorgehens und der ausgewählten Methoden dar. Diese Ergebnisse sowie die verfolgte Methodik wurden ständig mit den Industriepartnern und Experten in semi-strukturierten Interviews und Workshops überprüft. Auf diese Weise konnten im Rahmen der ersten Fallstudie die aus der Modularisierung erkannten physischen Module bestätigt werden. Ferner konnte der Verbesserungsvorschlag nach einer besseren Abstimmung zwischen dem Montageprozess und der physischen Produktarchitektur ebenfalls als sinnvoll bestätigt werden. Im Kontext dieser Fallstudie wurde außerdem erkannt, dass eine höhere Modulqualität in der physischen Produktarchitektur zu einer besseren Übereinstimmung der Produktarchitektur mit dem Montageprozess führt. Auf diesem Gebiet existieren bereits wissenschaftliche Arbeiten (VICKERY et al. 2015, KUBOTA et al. 2015). Dennoch sollte diese Aussage anhand weiterer Beispiele bestätigt werden. Letztlich konnten mit der Detaillierung der Analyse auf der Ebene der Konstruktionselemente die konkreten Ursachen für die Variantenvielfalt und Variantentreiber erkannt werden. Obwohl sich die konstruktive Umsetzung des Verbesserungsvorschlags zur Verschlinkung des Variantenbaums als nicht möglich erwiesen hat, kann die gleiche Vorgehensweise und Methodik nähere Untersuchung weiterer Stellen mit Standardisierungspotenzial angewendet werden.

Außerdem wurde im Rahmen der Neuentwicklung eines Alu-Steckers das Vorgehen vom Groben ins Detail zur Standardisierung und Erkennung der Ursachen für die interne Variantenvielfalt als positiv bewertet. Ähnlicherweise entsprach das Rahmenwerk vom Groben ins Detail für den Ventilbaukasten die unternehmensinterne Vorgehensweise zur Entwicklung neuer Geräte. Zudem wurde die Wirkung des Baukastens sowie der standardisierten Funktionsmodule für die Schaffung weiterer Standards bestätigt.

5.4.2 Evaluation und Diskussion des Vorgehens hinsichtlich der gestellten Forschungsziele

Unter Berücksichtigung der im Kapitel 1.3 gesetzten Ziele für diese Arbeit kann man nach der Durchführung der Fallstudien zu folgenden Schlüssen kommen. Durch die Bereitstellung der im Kapitel 4.1 vorgestellten Situationsmerkmalen und deren möglichen Ausprägungen kann eine Analysesituation eindeutig beschrieben werden. Darüber hinaus bieten diese Merkmale ein Rahmenwerk für eine systematische Analyse der jeweiligen Situation. Auf dieser Basis ist es möglich ein Analysevorhaben weiter bezüglich konkreter Zielsetzung, Durchführungsebene und Analyseperspektive zu konkretisieren und zu planen. Außerdem konnte mit der Durchführung und Diskussion der Fallstudien auch die Forschungsfrage (siehe Kap. 1.3.1) über den Zusammenhang zwischen einer konkreten Situation und die zu verfolgende Strategie beantwortet werden. Dennoch sind es nach der Meinung des Autors weitere Studien notwendig, um diesen Zusammenhang genau zu beschreiben. Zudem besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich des Einflusses weiterer Situationsmerkmale, wie zum Beispiel das Geschäftsmodell, die Wertschöpfungstiefe und die Wettbewerbsstrategie, die im Rahmen dieser Arbeit nur indirekt über die „Fertigungsart“ und die „Stoßrichtung der Analyse“ berücksichtigt wurden.

Die im Kapitel 4.4 vorgestellte Systematik zur Auswahl von geeigneten Methoden wurde mit der Durchführung der Fallstudien bestätigt. Diese Methodenauswahl bietet eine Unterstützung bei der zielorientierten Auswahl geeigneter Methoden zur Modellierung von Produktarchitekturen. In Kombination mit der Auswahl geeigneter Kennzahlen können diese Methoden auch für die Beurteilung des aktuellen Standes einer Produktarchitektur herangezogen werden. Anhand dieser Kennzahlen können außerdem Stellen in einer bestehenden Architektur erkannt werden, die optimiert werden können. Unter Berücksichtigung der konkreten Situation und Zielsetzung des jeweiligen Vorhabens kann dabei die Richtung dieser Verbesserung festgelegt werden. Trotzdem fehlt es an einer Systematik zur Beurteilung einer Produktarchitektur bezüglich der Einführung einer Baukastenstrategie, wie auch aus der dritten Fallstudie ersichtlich wurde.

5.4.3 Schlussfolgerungen und Reflexion des Vorgehens

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Vorgehen zur situationsgerechten Planung von Analysevorhaben für Produktarchitekturen stellt eine Vorgehensweise auf der abstrakten Ebene der operativen Arbeitsphasen dar. Das Vorgehen kann somit als generisch bezeichnet werden. Wie schon diskutiert, kann der Abstraktionsgrad des Vorgehens bei umfangreichen Analyseprojekten zu Intransparenz führen, was eine gewisse Erfahrung seitens des Anwenders notwendig macht. Praxiserfahrung ist außerdem für die Beurteilung des aktuellen Standes einer Produktarchitektur mittels Kennzahlen notwendig, da an dieser Stelle keine Richtwerte gegeben werden.

Ferner wurde im obigen Abschnitt als auch bei der Durchführung der Fallstudien gezeigt, dass sich konkrete Maßnahmen und Ansätze bei weniger komplexen Vorhaben direkt aus der Situationsanalyse auswählen lassen. Dafür wären allerdings eine tiefergreifende Betrachtung und Untersuchung der Thematik der Situationsanalyse notwendig.

Trotz des noch nötigen Forschungsbedarfes wurde im Rahmen dieser Arbeit ein schrittweises Vorgehen vorgestellt, das verschiedene Aspekte der Analyseplanung und der situationsgerechten Methodenauswahl abdeckt und unterstützt. Außerdem konnte durch die drei verschiedenen Fallstudien, die drei unterschiedliche Szenarien darstellen, der generische Charakter der Vorgehensweise gezeigt. Durch die logisch aufeinander bauenden Schritte zur Konkretisierung der Analyseaufgabe kann der Anwender navigieren, geeignete Methoden auswählen und eine situationsgerechte und zielorientierte Methodik aufstellen. Schlüsselfaktor bleibt der Anwender selbst, der durch sein bewusstes Handeln eine Analyse erfolgreich planen und durchführen kann.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Der stetig wachsende Bedarf an individualisierten Produkten im globalisierten Umfeld erhöht kontinuierlich den Druck an Unternehmen. Einerseits um nachhaltige Marktstrategien zu verfolgen und das Unternehmen richtig am Markt zu positionieren. Andererseits um im operativen Geschäft ständig effizienter zu werden und nach operativer Exzellenz zu streben. Die Produktarchitektur stellt dabei einen bedeutenden Stellhebel für die produzierenden Unternehmen dar. Durch die Entwicklung skalierbarer, kombinierbarer und erweiterbarer Produktarchitekturen kann die geforderte Flexibilität im Produktprogramm eines Unternehmens erreicht werden, um den sich ständig ändernden Kundenanforderungen gerecht zu werden. Außerdem können durch situationsgerecht aufgestellte Produktarchitekturen Synergie- und Skaleneffekte in verschiedenen Unternehmensbereichen erreicht werden, um dem Ziel der operativen Exzellenz näher zu kommen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es eine schrittweise Vorgehensweise vorzustellen, um den Anwender durch die Planung und Durchführung von Analyse- und Verbesserungsprojekten methodisch und systematisch zu unterstützen. Dabei ist es wichtig, den Begriff Produktarchitektur genau zu definieren. Im Kontext dieser Arbeit umfasst die Architektur eines Produktes drei Betrachtungsdomänen; die physische und funktionale Struktur des Produktes sowie die Variantenvielfalt.

Die jeweilige Unternehmenssituation ist für die Planung und genauen Zielsetzung einer Architekturanalyse von essentieller Bedeutung. Aufgrund dessen stellt der erste Schritt der vorgestellten Vorgehensweise eine Situationsanalyse dar. Wobei die jeweilige Situation anhand bestimmter Merkmale eindeutig definiert werden kann. Als solche werden beispielsweise der Umfang der Aufgabe/Analyse, die Fertigungsart sowie die Komplexität des betrachteten Gegenstandes identifiziert.

Ausgehend von der genauen Bestimmung der Anwendungssituation wird eine übergeordnete Zielsetzung für die Analyse der Produktarchitektur festgelegt. Um diese Zielsetzung erreichen zu können, wird im Anschluss ein strategischer Ansatz ausgewählt, der auch eine Konkretisierung der Zielsetzung darstellt. Der strategische Ansatz kann beispielsweise die Einführung einer Baukastenstrategie oder auch die Erhöhung des Standardisierungsniveaus sein, um das Ziel der Reduktion der internen Varianz zu verfolgen.

Nachdem das Ziel und der strategische Ansatz für die Analyse gesetzt wurden, kann in den folgenden Schritten das Analysevorhaben konkreter geplant werden. Wichtig dabei sind die Anwendungsebenen sowie die Perspektiven, aus denen die Produktarchitektur analysiert werden soll. Außerdem soll in diesem Schritt auch festgelegt werden, auf welchen Ebenen nach Verbesserungspotenzial gesucht werden soll. Auf diese Weise entsteht eine Abgrenzung der Analyse und somit wird das Vorhaben transparenter und einfacher zu handhaben. Ferner kann auf dieser Basis die konkrete Methodenauswahl unterstützt werden.

Um die Auswahl von Analysemethoden für Produktarchitekturen zu erleichtern, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zehn gängige Methoden hinsichtlich ihrer Anwendungsgebiete und ihrer Möglichkeiten kategorisiert. Auf Basis der festgelegten Abgrenzung und der jeweiligen Situation wird dabei eine Auswahlmethodik bereitgestellt. Dabei wurde festgestellt, dass keine geeigneten Analyse- und Modularisierungsmethoden für die ganzheitliche Betrachtung eines variantenreichen Produktprogramms zur Verfügung stehen. Infolge dessen und am Beispiel der dritten Fallstudie zur „Standardisierung und Baukastenentwicklung im Produktprogramm von pneumatischen Ventilen“ wurde im Kontext dieser Arbeit eine Methode zur Modularisierung variantenreicher Produktarchitekturen entwickelt.

Aufgrund der Komplexität und des breiten Umfangs vieler Situationen ist oft der Fall, dass verschiedene Methoden in einer Methodik organisiert werden. Dafür wird dem Anwender eine Systematik zur Verfügung gestellt, um Methoden anhand ihres Zweckes in einer logischen Reihenfolge zusammen zu fügen.

Der letzte Schritt der vorgestellten Vorgehensweise befasst sich mit der Durchführung der Analyse. Ausgehend von der Erfassung des aktuellen Standes der betrachteten Produktarchitektur wird der IST-Zustand anhand der im vorherigen Schritt ausgewählten Kriterien beurteilt. Dies dient auch als Grundlage für die Erkennung von Schwachstellen beziehungsweise von Stellen mit Verbesserungspotenzial. Die durchzuführenden Verbesserungen sollen im Anschluss in einem SOLL-Zustand, der angestrebt wird, dokumentiert werden. In diesem Punkt sind die strukturellen und gegebenenfalls die konstruktiven Verbesserungsvorschläge abzuleiten, um den erwünschten Stand zu erreichen. Abschließend sind die erarbeiteten Verbesserungsvorschläge mit den Konstruktionsexperten sowie mit weiteren betroffenen Bereichen in einem Unternehmen kritisch zu diskutieren und auf Machbarkeit zu überprüfen.

6.2 Ausblick

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte Vorgehensweise wird an drei Fallstudien aus der industriellen Praxis angewendet und evaluiert. Diese Fallstudien stellen außerdem drei unterschiedliche Ausgangssituationen für die Vorgehensweise dar. Somit kann auch der generische Charakter des Vorgehens und der Systematik gezeigt werden. Unter anderem wird die Aufstellung modularer Produktfamilien, die Standardisierung entlang der Variantenvielfalt sowie die Baukastenentwicklung untersucht.

Aus der Durchführung der Fallstudien können wichtige Erkenntnisse für die Anwendbarkeit, die weiteren Möglichkeiten sowie für die Schwächen der Vorgehensweise gewonnen werden. Auf dieser Basis soll in diesem Abschnitt ein kurzer Ausblick über den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben werden.

Wie auch die Fallstudien gezeigt haben, besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich der ersten Schritte der Vorgehensweise. Dabei sollen die Zusammenhänge zwischen Situation und Analyseziele sowie der Einfluss weiterer Situationsmerkmale näher untersucht und systematisiert werden. Ein wichtiger Punkt ist der Einfluss von Situationsmerkmalen auf die Zielsetzung eines Analysevorhabens. Nach der Meinung des Autors besitzen bestimmte

Merkmale eine ausschlaggebende Rolle im Sinne der Festlegung des Analysezieles. Beispiele dafür sind die Fertigungsart, die strukturelle Komplexität des Produktes sowie die Art der Entwicklungsaufgabe. Aus diesen Merkmalen können dann die Hauptzielsetzung oder die Schwerpunkte der Analyse abgeleitet werden.

Außerdem zeigen die Fallstudien, dass der zu verfolgende Ansatz für die Produktarchitektur direkt von der jeweiligen Situation beeinflusst wird. Zudem wird gezeigt, dass der Umfang der Aufgabe/Analyse einen direkten Einfluss auf die zu verfolgende Strategie hat. Es ist beispielsweise vorteilhafter für eine begrenzte Produktfamilie oder für ein einzelnes Produkt eine modulare Produktarchitektur anzustreben statt einen Baukastenansatz zu verfolgen. Bei einem breiteren Betrachtungsumfang können durch die Anwendung einer Baukastenstrategie weitreichende Potenziale und Skaleneffekte erreicht werden. Es besteht aber weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Untersuchung der Auswirkungen und Abhängigkeiten zwischen Situation, Zielsetzung und strategischem Ansatz.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der zur Vervollständigung der vorgestellten Vorgehensweise führen wird, ist die Ergänzung der bereitgestellten Methodenliste mit weiteren Methoden zur Analyse und Modularisierung von Produktarchitekturen. Darüber hinaus werden ebenfalls die Erweiterung der Auswahlsystematik und die Berücksichtigung von Kennzahlen und Strukturmerkmalen zu einer besseren Unterstützung des Anwenders führen.

Auf diese Weise kann ein wertvoller Beitrag für die Unterstützung von komplexen Analysevorhaben mit dem Ziel der Verbesserung von Produktarchitekturen geleistet werden.

7. Anhang

7.1 Erfahrungsgrundlage des Autors

Im Folgenden werden die Forschungsprojekte, die der Autor bearbeitet hat, aufgelistet und kurz erläutert. Diese Forschungsprojekte bilden die für diese Arbeit relevante Erfahrungsgrundlage des Autors.

1. Schaffung von Transparenz im interdisziplinären Produktentstehungsprozess von mechatronischen Produkten durch die Entwicklung eines Ansatzes zur integrierten, disziplinübergreifenden Produkt- und Prozessmodellierung.
Vorgehen: Prozessanalyse der Serienentwicklung von einem mechatronischen Produkt. Systemdefinition, Erfassung der relevanten Betrachtungsdomänen und Akquise von Informationen. Entwicklung eines geeigneten methodischen Ansatzes zur Visualisierung der Systemzusammenhänge.
2. Reduktion der internen Komplexität und Variantenvielfalt durch die Definition von Standards für die Pneumatik Industrie
Vorgehen: Betrachtung und Analyse mehrerer Produktfamilien im Produktsortiment. Wettbewerbsanalyse und Bewertung der internen konstruktiven Lösungen zur Umsetzung von Funktionen. Standardisierung und Modularisierung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, die von der Technologie- und Bauteil- bis hin zur Systemebene reichen und Aufstellung eines Baukastensystems zur Systematisierung des Entwicklungsprozesses
3. Schaffung von Transparenz und Definition von Entwicklungsschwerpunkten bei der Entwicklung von SuperCaps
Vorgehen: Systemdefinition und Erfassung aller relevanten Elemente. Identifikation von Abhängigkeiten zwischen den Elementen und Bestimmung einer optimalen Systemkonfiguration zur Erfüllung der Zielfunktion
4. Entwicklung und Konstruktion eines innovativen Hochvolt-Bordnetzes aus Aluminium für zukünftige Hybridfahrzeuge bis zur Serienreife
Vorgehen: Anforderungsermittlung und -strukturierung. Funktionsanalyse des neuen Hochvolt-Bordnetzes. Lösungsfindung und Konstruktion eines neuartigen Steckerkonzeptes. Identifikation der notwendigen Varianten und Definition eines Baukastensystems
5. Analyse der aktuellen Produktarchitektur einer Produktfamilie von Wasserheizgeräten und Erkennung von Verbesserungspotenzial zur Komplexitätsreduzierung und Standardisierung

Vorgehen: Zieldefinition, Aufnahme und Modellierung der aktuellen Produktarchitektur. Aufnahme des Montageprozesses und Analyse der Produktarchitektur aus der Perspektive des Montageprozesses, der Variantengenerierung und der Lieferantenstruktur. Erkennung von Schwachstellen und Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen für die Produktfamilie

7.2 Betreuung relevanter Studienarbeiten durch den Autor

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Studienarbeiten aufgelistet, die vom Autor initiiert und betreut wurden.

BIR 2011

Bir, A. F.: Modularisierung und Schnittstellenbeschreibung eines Nutzfahrzeuges. unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München, München (2011).

BLÖCHL 2011

Blöchl, G.: Komplexitätsmanagement im Produktportfolio. unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, München (2011).

ENBLIN 2011

Enßlin, V.: Modularisierung als Ansatz zur Varianten- und Komplexitätsbeherrschung. unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München (2011).

HAMIDI 2012

Hamidi, M.: Modularisierung und Standardisierung in der Einzelfertigung. unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München, München (2012).

MOOSBAUER 2012

Moosbauer, C.: Ansätze zur integrierten Produktarchitektur- und Prozessoptimierung. unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, München (2012).

NADLER 2012

Nadler, C.: Optimierung von Produktarchitekturen am Beispiel einer Zitruspresse. unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München (2012).

REINECKER 2009

Reinecker C.: Aufstellen eines Baukastensystems für Zitruspressen, unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, München (2009).

7.3 Fallstudie 2: Neuentwicklung einer Produktfamilie von Hochvolt-Aluminiumstecker

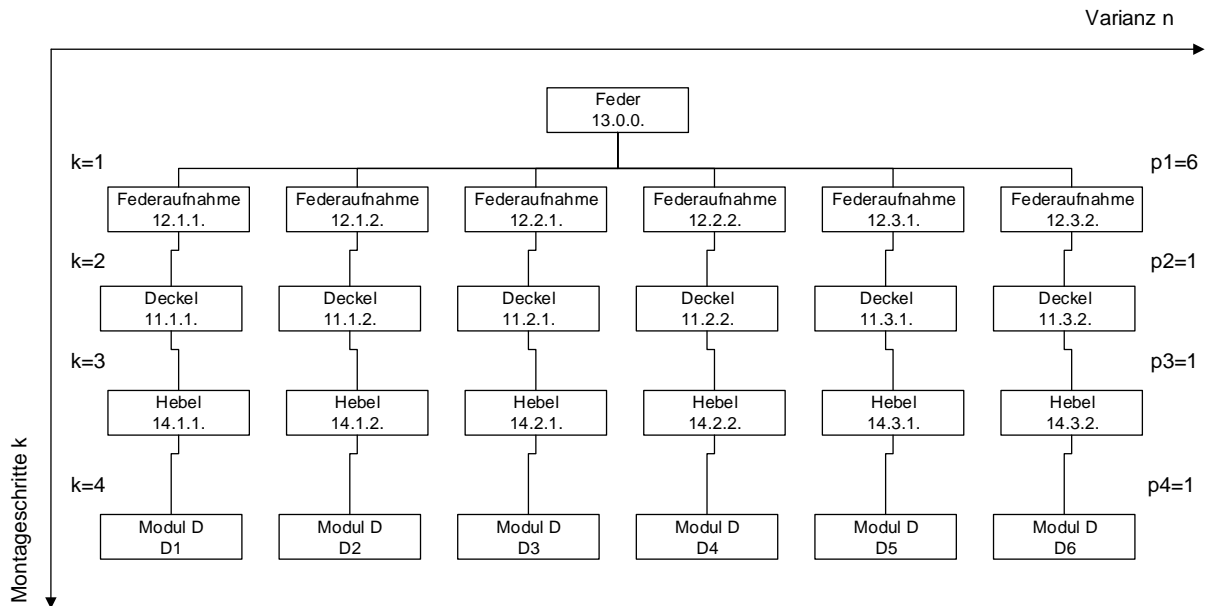


Abbildung 7-1: Variantenbaum des Moduls D vor der Standardisierung

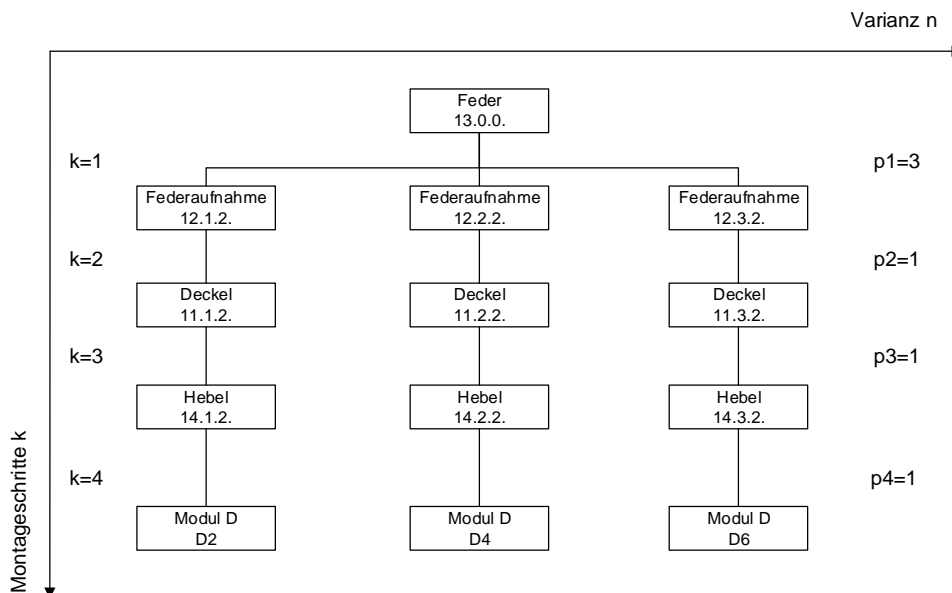


Abbildung 7-2: Variantenbaum des Moduls D nach der Standardisierung

8. Literaturverzeichnis

ADAM & JOHANNWILLE 1998

Adam, D.; Johannwille, U.: Die Komplexitätsfalle. In: Adam, D. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement, Schriften zur Unternehmensführung. Wiesbaden, 1998, S. 5-28. (Band 61).

ALBERS et al. 2008

Albers, A.; Sedchaicharn, K.; Sauter, C.; Burger, W.: An approach for the modularization of a product architecture of redesign processes of complex systems. ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. New York, 2008.

ALLEN & CARLSON-SKALAK 1998

Allen, K. R.; Carlson-Skalak: Defining product architecture during conceptual design. Design Engineering Technical Conferences (DETC1998). New York, 1998.

ARTS et al. 2008

Arts, L.; Chmara, M.; Tomiyama, T.: Modularization method for adaptable products. ASME International Design Engineering Technical Conferences. 2008.

BAUER et al. 2011

Bauer, W.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Approach for a modularization driven system definition using multiple domains. 13th International DSM Conference. Cambridge, MA, USA, 14.-15.09.2011 2011.

BAUMBERGER et al. 2007

Baumberger, C.; Blessing, I.; Lindemann, U.: Entwicklung und Herstellung von individualisierten Produkten. In: Krause, F.-L. et al. (Hrsg.): Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. München, Hanser 2007, S. 107-115. ISBN: 978-3-446-40667-4.

BEHNCKE 2015

Behncke, F.: Beschaffungsgerechte Produktentwicklung - Abstimmung von Produktarchitektur und Liefernetzwerk in frühen Phasen der Entwicklung. Dissertation, Technische Universität München, München (2015).

BEHNCKE et al. 2011

Behncke, F.; Abele, K.; Lindemann, U.: Impact of product design decisions within product development on the supplier selection process at the automotive industry. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, 06.-09.12.2011 2011.

BEHNCKE et al. 2013a

Behncke, F.; Daniilidis, H.; Elezi, F.; Lindemann, U. (Hrsg.): Projektabschlussbericht: Optimierung von Produktarchitekturen am Beispiel eines Heizgerätes. Lehrstuhl für Produktentwicklung, München (2013a).

BEHNCKE et al. 2013b

Behncke, F. G. H.; Kübel, T.; Lindemann, U.: Supplier evaluation based on a product's architecture. 15TH INTERNATIONAL DEPENDENCY AND STRUCTURE MODELLING CONFERENCE. MELBOURNE, AUSTRALIA, AUGUST 28 – 30, 2013 2013b.

BERGLUND et al. 2008

Berglund, F.; Bergsjö, D.; Högman, U.; Khadke, K.: PLATFORM STRATEGIES FOR A SUPPLIER IN THE AIRCRAFT ENGINE INDUSTRY. International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering (IDETC/CIE2008). New York, 2008.

BIEDERMANN 2014

Biedermann, W.: A minimal set of network metrics for analysing mechatronic product concepts. Dissertation, Technische Universität München, München (2014).

BIR 2011

Bir, A. F.: Modularisierung und Schnittstellenbeschreibung eines Nutzfahrzeuges. unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München, München (2011).

BLEES 2011

Blees, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktarchitekturen. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg (2011).

BLEES C. et al. 2010

Blees C.; Kipp T.; Beckmann G.; D., K.: Development of Modular Product Families Integration of Design for Variety and Modularization. NordDesign. Göteborg, Sweden, August 25 - 27 2010.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. London: Springer 2009. ISBN: 1848825862.

BLÖCHL 2011

Blöchl, G.: Komplexitätsmanagement im Produktportfolio. unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, München (2011).

BÖHL 2000

Böhl, J.: Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, Technische Universität München, München (2000).

BOROWSKI 1961

Borowski, K. H.: Das Baukastensystem in der Technik. Berlin: Springer Verlag 1961.

BRAUN et al. 2013

Braun, B.; Kissel, M.; Förg, A.; Kreimeyer, M.: Referenzmodell zur Analyse von Baukastensystematiken in der Nutzfahrzeugindustrie. In: Tagungsband zum 24. DfX-Symposium, Hamburg,

BRAUN & LINDEMANN 2003

Braun, T.; Lindemann, U.: Supporting the Selection, Adaptation and Application of Methods in Product Development. In: Folkesson, A. et al. (Hrsg.): 14th International Conference on Engineering Design ICED'03, Stockholm (Sweden), 19.-21.08.2003. Design Society

BRAUN 2005

Braun, T. E.: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. Dissertation, Technische Universität München, München (2005). (München: Dr. Hut 2005 (Produktentwicklung München, Band 60))

BROWNING 2001

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

BROWNING 2015

Browning, T. R.: Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities. IEEE Transactions on Engineering Management (2015)

CHATRAS & VINCENT 2015

Chatras, C.; Vincent, G.: Standardization, Commonality, Modularity: A Global Economic Perspective. In: Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth. Berlin, Heidelberg, Springer International Publishing 2015, S. 365-375.

DANIILIDIS et al. 2010

Daniilidis, C.; Eben, K.; Deubzer, F.; Lindemann, U.: Simultaneous modularization and platform identification of product family variants. 8th NordDesign Conference. Göteborg, Sweden, 25.-27.08.2010 2010.

DANIILIDIS et al. 2009

Daniilidis, C.; Eben, K.; Lindemann, U.: A functional analysis approach for product reengineering. TRIZfuture Conference 2009. Timisoara, Rumänien, 2009.

DANIILIDIS et al. 2011a

Daniilidis, C.; Enßlin, V.; Eben, K.; Lindemann, U.: A classification framework for product modularization methods. 18th International Conference on Engineering Design. Copenhagen, Denmark, 15.-18.08.2011 2011a.

DANIILIDIS et al. 2012a

Daniilidis, H.; Bauer, W.; Eben, K.; Lindemann, U.: Compendium for modular and platform based architecting. Conference on Systems Engineering Research (CSER). St. Louis, MO, USA, 19-22.03.2012 2012a.

DANIILIDIS et al. 2012b

Daniilidis, H.; Bauer, W.; Eben, K.; Lindemann, U.: Systematic goal definition for complexity management projects. IEEE International Systems Conference. Vancouver, B.C., Canada, 19-22.03.2012 2012b.

DANIILIDIS et al. 2011b

Daniilidis, H.; Hellenbrand, D.; Bauer, W.; Lindemann, U.: Using Structural Complexity Management for Design Process Driven Modularization. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, 06.-09.12.2011 2011b.

DANIILIDIS et al. 2012c

Daniilidis, H.; Kaiser, K.; Thalmeier, M.; Vogt, S.; Steinhoff, G.; Respondek, M.; Espertshuber, R.; Mitter, A.; Steinberg, H.; Mayer, U.; Lindemann, U. (Hrsg.): LEIKO Abschlussbericht 2012: Leiter und Kontaktierung zukünftiger Elektrofahrzeugbordnetze. Kooperationsprojekt gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, München (2012c).

DANIILIDIS & LINDEMANN 2012

Daniilidis, H.; Lindemann, U.: Assembly process driven product architecting. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) Hong Kong, 2012.

DANILOVIC & BROWNING 2004

Danilovic, M.; Browning, T. R.: A Formal Approach for Domain Mapping Matrices (DMM) to Complement Design Structure Matrices (DSM). 6th Design Structure Matrix (DSM) International Workshop. Cambridge, 2004.

DANILOVIC & BROWNING 2007

Danilovic, M.; Browning, T. R.: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. International Journal of Project Management 25 (2007) 3, S. S. 300-314.

DE WECK et al. 2003

De Weck, O.; Suh, E. S.; Chang, D.: Product Family and Platform Portfolio Optimization. Design Engineering Technical Conference (DETC03). 2003.

DE WECK 2007

de Weck, O. L.: On the Role of DSM in Designing Systems and Products for Changeability. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): 9th International DSM Conference, Munich, 16.-18.10.2008. Aachen: Shaker 2007, S. 311-323. ISBN: 978-3-8322-6641-7.

EBEN et al. 2009

Eben, K.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Problem solving for multiple product variants. TRIZfuture Conference 2009. Timisoara, Rumänien, 2009.

EBEN et al. 2010

Eben, K.; Daniilidis, C.; Lindemann, U.: Interrelating and prioritising requirements on multiple hierarchy levels. 11th International Design Conference DESIGN 2010. Dubrovnik - Croatia, 17.-20.05.2010 2010.

EBEN & LINDEMANN 2010

Eben, K.; Lindemann, U.: Structural analysis of requirements - interpretation of structural criterions. 12th International DSM Conference. Cambridge, UK, 22.-23.07.2010 2010.

EHRENSPIEL 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4., aktualisierte Auflage. München: Hanser 2009. ISBN: 3-446-42013-4.

EHRENSPIEL et al. 2007a

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Cost Efficient Design. Berlin: Springer 2007a. ISBN: 978-3-540-34647-0. (ASME Press).

EHRENSPIEL et al. 2007b

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren - Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6., überarb. u. korr. Aufl. Auflage. Berlin: Springer 2007b. ISBN: 978-3-540-74222-7.

EICHINGER et al. 2006

Eichinger, M.; Maurer, M.; Lindemann, U.: Using Multiple Design Structure Matrices. 9th International Design Conference DESIGN 2006. Dubrovnik, 15.-18.05.2006 2006.

EIGNER & ZAGEL 2007

Eigner, M.; Zagel, M.: Product Structures Designed for Variants. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): 9th International DSM Conference, Munich, 16.-18.10.2008. Aachen: Shaker 2007, S. 249-260. ISBN: 978-3-8322-6641-7.

ENBLIN 2011

Enßlin, V.: Modularisierung als Ansatz zur Varianten- und Komplexitätsbeherrschung. unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München (2011).

ERICSSON & ERIXON 1999

Ericsson, A.; Erixon, G. (Hrsg.): Controlling design variants: modular product platforms. ASME Press, New York.

ERIXON 1998

Erixon, G.: Modular Function Deployment. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm (1998).

FEESS 2011

Feess, E.: Komplexität. Gabler Wirtschaftslexikon <<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/5074/komplexitaet-v6.html>> - Gabler Verlag, 19.6.2011

FELDHUSEN 2011

Feldhusen: Konstruktionslehre II - Baukästen, Module, Plattformen, Features. Konstruktionstechnik, I. f., Aachen, 2011

FELDHUSEN 2006

Feldhusen, J.: Kooperative Produktgestaltung. Vorlesungsskript, RWTH-Aachen, Aachen, 2006

FIXSON 2007

Fixson, S.: Modularity and commonality research: past developments and future opportunities. Concurrent Engineering 15 (2007) 2, S. 85.

FRANKE et al. 2002

Franke, H. J.; Hesselbach, J.; Huch, B.; Firchau, N. L.: Variantenmanagement in Einzel- und Kleinserienfertigung. München: Hanser 2002.

FRIEDRICH et al. 2015

Friedrich, M.; Kremer, A.; Strauss, R.: Und täglich grüßt die Variantenvielfalt - Variantenplanung als Basis für Produktkonfiguratoren. Complexity Management Journal 5 (2015) 4, S. 12-17.

FUJITA & ISHII 1997

Fujita, K.; Ishii, K.: Task structuring toward computational approaches to product variety design. ASME International Design Engineering Technical Conferences. Citeseer, 1997.

FUJITA et al. 1999

Fujita, K.; Sakaguchi, H.; Akagi, S.: Product variety deployment and its optimization under modular architecture and module commonalization. ASME International Design Engineering Technical Conferences. 1999.

FUJITA & YOSHIDA 2001

Fujita, K.; Yoshida, H.: Product variety optimization: simultaneous optimization of module combination and module attributes. ASME International Design Engineering Technical Conferences. 2001.

GAUSEMEIER et al. 2007

Gausemeier, J.; Kahl, S.; Steffen, D.: Using DSM for the Modularization of Self-Optimizing Systems. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): 9th International DSM Conference, Munich, 16.-18.10.2008. Aachen: Shaker 2007, S. 235-247. ISBN: 978-3-8322-6641-7.

GERHARD 1984

Gerhard, E.: Baureihenentwicklung. Grafenau/Württ: expert-Verlag 1984. ISBN: 3885088665.

GERSHENSON et al. 2003

Gershenson, J. K.; Prasad, G. J.; Zhang, Y.: Product modularity: Definitions and benefits. Journal of Engineering Design 14 (2003) 3, S. 295-313.

GERSHENSON et al. 2004

Gershenson, J. K.; Prasad, G. J.; Zhang, Y.: Product modularity: measures and design methods. Journal of Engineering Design 15 (2004) 1, S. 33-51.

GÖPFERT 2009

Göpfert, J.: Modulare produktentwicklung: zur gemeinsamen gestaltung von technik und organisation. 2. Auflage Auflage. Norderstedt: BoD-Books on Demand 2009. ISBN: 383703559X.

GRESHAKE 2011

Greshake, P.-T.: Modularität - das richtige Maß entscheidet! Kundenzeitschrift der 3D Systems Engineering GmbH 5 (2011) 12

GU & SOSALE 1999

Gu, P.; Sosale, S.: Product modularization for life cycle engineering. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 15 (1999) 2

GU & WATSON 2001

Gu, P.; Watson, G.: HOME: House of modular enhancement for product redesign for modularization. ASME Design Engineering Technical Conferences - 13th International Conference on Design Theory and Methodology. Pittsburg, Pennsylvania, 2001.

GUO & GERSHENSON 2004

Guo, F.; Gershenson, J.: A comparison of modular product design methods based on improvement and iteration. In: ASME International Design Engineering Technical Conferences, S. 261-269.

HABERFELLNER 2002

Haberfellner, R.: Systems Engineering: Methodik und Praxis. Verl. Industrielle Organisation 2002. ISBN: 385743998X.

HAMIDI 2012

Hamidi, M.: Modularisierung und Standardisierung in der Einzelfertigung. unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München, München (2012).

HANSEN et al. 2012

Hansen, C. L.; Mortensen, N. H.; Hram, L.: Calculation of Complexity Costs: An Approach for Rationalizing a Product Program. NordDesign Conference. Aalborg, 2012.

HELMER et al. 2007

Helmer, R.; Yassine, A.; Meier, C.: Module and Interface Identification and Definition – A Comprehensive Approach Using DSM. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): 9th International DSM Conference, Munich, 16.-18.10.2008. Aachen: Shaker 2007, S. 201-213. ISBN: 978-3-8322-6641-7.

HEBLING 2006

Heßling, T.: Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Dissertation, Technische Universität München, München (2006). (München: Dr. Hut 2006 (Produktentwicklung München, Band 62))

HÖLTTÄ-OTTO et al. 2012

Hölttä-Otto, K.; Chiriac, N. A.; Lysy, D.; Suk Suh, E.: Comparative Analysis of Coupling Modularity Metrics. Journal of Engineering Design 23 (2012) 10-11

HÖLTTÄ-OTTO & DE WECK 2007

Hölttä-Otto, K.; de Weck, O. L.: Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. Concurrent Engineering 15 (2007) 2

HÖLTTÄ-OTTO & SALONEN 2003

Hölttä-Otto, K.; Salonen, M. P.: Comparing Three Different Modularity Methods. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering (IDETC/CIE2003). New York, 2003.

ISHII et al. 1995

Ishii, K.; Juemgel, C.; Eubanks, C.: Design for product variety: key to product line structuring. ASME International Design Engineering Technical Conferences. 1995.

JESCHKE 1997

Jeschke, A.: Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig 1997.

JIAO et al. 2007

Jiao, J.; Simpson, T. W.; Siddique, Z.: Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review. Journal of Intelligent Manufacturing 18 (2007) 1, S. 5-29.

JIAO & TSENG 1999

Jiao, J.; Tseng, M. M.: A methodology of developing product family architecture for mass customization. Journal of Intelligent Manufacturing 10 (1999) 1, S. 3-20.

JIAO & TSENG 2004

Jiao, J.; Tseng, M. M.: Customizability analysis in design for mass customization. Computer-Aided Design 36 (2004)

JONAS 2014

Jonas, H.: Eine Methode zur strategischen Planung modularer Produktprogramme. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg (2014).

KALIGEROS et al. 2006

Kaligeros, K.; De Weck, O.; De Neufville, R.; Luckins, A.: Plattform Identification using design structure matrices. Sixteenth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE). Citeseer, 2006.

KERSTEN 1999

Kersten, W.: Wirksames Variantenmanagement durch Einbindung in den Controlling- und Führungsprozess im Unternehmen. In: Plattformkonzepte auch für Kleinserien und Anlagen?, Stuttgart, VDI-Verlag S. 155-175.

KESPER 2012

Kesper, H.: Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden. Dissertation, Technische Universität München, München (2012).

KIPP 2012

Kipp, T.: Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg (2012).

KIPP et al. 2010

Kipp, T.; Blees, C.; Krause, D.: Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. In: Tagungsband zum 21. DfX-Symposium, Hamburg

KIPP & KRAUSE 2008

Kipp, T.; Krause, D.: Design for Variety - Ein Ansatz zur variantengerechten Produktstrukturierung. 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Aachen, 2008.

KIRNER et al. 2013

Kirner, K.; Daniilidis, H.; Lindemann, U. (Hrsg.): Ergebnisbericht: Methodische Entwicklung eines Standards für die Ventiltechnologie in Bremssystemen für Schienenfahrzeuge der Knorr Bremse Sfs GmbH. Lehrstuhl für Produktentwicklung, München (2013).

KISSEL 2014

Kissel, M.: Mustererkennung in komplexen Produktportfolios. Dissertation, Technische Universität München, München (2014).

KNORR-BREMSE 2008

Knorr-Bremse: Technische Beschreibung Kolbenventil WKV1-T 2008.

KÖHLHASE 1997

Kohlhase, N.: Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen: Strategien, Methoden, Instrumente. VDI Konstruktionstechnik/Maschinenelemente 275 (1997)

KREIMEYER 2009

Kreimeyer, M.: A Structural Measurement System for Engineering Design Processes. Dissertation, Technische Universität München, München (2009). (München: Dr. Hut 2009 (Produktentwicklung))

KUBOTA et al. 2015

Kubota, F. I.; Miguel, P. A. C.; Hsuan, J.: Analysis of the theoretical relationships between product and production modularity and their implications in the automotive industry. 22nd EurOMA Conference. Neuchâtel, Switzerland, June 26th - July 1st 2015.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden 3. Aufl. Auflage. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3642014222.

LINDEMANN & BAUMBERGER 2006

Lindemann, U.; Baumberger, C.: Individualisierte Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin, Springer 2006, S. 7-16. ISBN: 978-3-540-25506-2.

LINDEMANN & FREYER 2000

Lindemann, U.; Freyer, B.: Standardisierung bei Anpassungs- und Variantenkonstruktionen. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 11. Symposium, Schnaittach, 12.-13.10.2000. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik S. 120-125.

LINDEMANN et al. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management - An Approach for the Field of Product Design. 1. Auflage Auflage. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-87888-9.

LINDEMANN et al. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: ISBN-10 3-540-25506-0.

LINDEMANN et al. 2002

Lindemann, U.; Zäh, M.; Gahr, A.; Pulm, U.; Ulrich, C.; Wagner, W.: Massenproduktion mit Losgröße 1. ZWF Nr.05/97 (2002) 5, S. 269-273.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Springer 2006. ISBN: 3540214135.

LUGO-MÁRQUEZ et al. 2015

Lugo-Márquez, S.; Guarín Grisales, Á.; Rubio, O.; Eder, W. E.: Modular redesign methodology for improving plant layout. Journal of Engineering Design (2015) S. 1-25.

MALIK 2003

Malik, F.: Strategie des Managements komplexer Systeme, 8. Auflage Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag 2003.

MARTI 2007

Marti, M.: Complexity management: optimizing product architecture of industrial products. 1. Aufl. Auflage. Wiesbaden: Duv 2007. ISBN: 978-3-8350-0866-3.

MARTIN & ISHII 1997

Martin, M.; Ishii, K.: Design for Variety: development of complexity indices and design charts. ASME Design Engineering Technical Conference. Sacramento, 1997.

MARTIN M. 2002

Martin M., I. K.: Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. Research in Engineering Design 13 (2002) S. 213-235.

MAURER et al. 2009

Maurer, M.; Braun, T.; Lindemann, U.: Information visualization for the Structural Complexity Management Approach. 19th Annual International Symposium of INCOSE. Singapore, 20.-23.07.2009 2009.

MAURER & LINDEMANN 2007

Maurer, M.; Lindemann, U.: Structural awareness in complex product design – The Multiple-Domain Matrix. 9th International DSM Conference. Munich, 16.-18.10.2007 2007.

MAURER et al. 2006

Maurer, M.; Pulm, U.; Eichinger, M.; Lindemann, U.: Extending Design Structure Matrices and Domain Mapping Matrices by Multiple Design Structure Matrices. 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ASME-ESDA06). Turin, 4.-7.7.2006 2006.

MAURER 2007

Maurer, M. S.: Structural Awareness in Complex Product Design. Dissertation, Technische Universität München, München (2007). (München: Dr. Hut 2007 (Produktentwicklung))

MOOSBAUER 2012

Moosbauer, C.: Ansätze zur integrierten Produktarchitektur- und Prozessoptimierung. unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, München (2012).

NADLER 2012

Nadler, C.: Optimierung von Produktarchitekturen am Beispiel einer Zitruspresse. unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München (2012).

NEWCOMB et al. 1998

Newcomb, P.; Bras, B.; Rosen, D.: Implication of Modularity on Product Design for the Life Cycle. Journal of Mechanical Design 120 (1998) 3

PAHL et al. 2006

Pahl, G.; Beitz, W.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer 2006. ISBN: 13: 978-3540340607

PILLER & WARINGER 1999

Piller, F. T.; Waringer, D.: Modularisierung in der Automobilindustrie: Neue Formen und Prinzipien; modular sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements. 1. Aufl. Auflage. Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-8265-5827-8.

PIMMLER & EPPINGER 1994

Pimmler, T. U.; Eppinger, S. D.: Integration analysis of product decompositions. Massachusetts: Alfred P. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology 1994.

PONN & LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungslösungen. 2. Auflage Auflage. Berlin Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-20579-8.

PORTER 2004

Porter, M. E.: Wettbewerbsvorteile - Spitzenleistungen erreichen und behaupten. 6. Auflage Auflage. Frankfurt Campus-Verlag 2004. ISBN: 3-593-36178-7.

PROBST & ULRICH 1988

Probst, G. J.; Ulrich, H.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte Bern, Stuttgart: Haupt 1988.

RAPP 2010

Rapp, T.: Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen. Books on Demand 2010.

REINHART et al. 2000a

Reinhart, G.; Bender, K.; Lindemann, U.; Reichwald, R.; Amft, M.; Bichlmaier, C.; Seiffert, K. J.; Grunwald, S.; Lulay, W.; Murr, O.; Prinz, O.; Schmalzl, B.; Stetter, R.; Zanner, S.: Methoden und Werkzeuge zur Konfiguration und Steuerung integrierter Entwicklungsprozesse von Produkt und Montageanlage. München: TU 2000a. (SFB 336. Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung. Arbeits- und Ergebnisbericht 1998-1999-2000).

REINHART et al. 2000b

Reinhart, G.; Glander, M.; Grunwald, S.; Reicheneder, J.; Stetter, R.; Zanner, S.: Flexible Produktentwicklung und Montageplanung mit integrierten Prozessbausteinen. ZWF Nr.95/00 (2000b) 1-2, S. 19-22.

RENNER 2007

Renner, I.: Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Dissertation, Technische Universität München, München (2007). (München: Dr. Hut 2007 (Produktentwicklung))

SALVADOR 2007

Salvador, F.: Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. IEEE Transactions on Engineering Management Vol. 54 (2007)

SANCHEZ & SUDHARSHAN 1993

Sanchez, R.; Sudharshan, D.: Real-Time Market Research. Marketing Intelligence & Planing 11 (1993) 7, S. 29-38.

SCHENKL et al. 2011

Schenkl, S.; Ponn, J.; Lindemann, U.: Managing Uncertainties of Requirements in Product Platform Development. International Conference on Research into Design. Bangalore, India, 10.-12.01.2011 2011.

SCHMIDT et al. 2014

Schmidt, D. M.; Schenkl, S. A.; Maurer, M.: Evaluation of Knowledge to Future-Proof the Knowledge Base Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference. Dubrovnik, Croatia, 19.05-22.05.2014 2014.

SCHMIDT et al. 2013

Schmidt, D. M.; Schenkl, S. A.; Wickel, M. C.; v. Saucken, C.; Maurer, M.: Multiple-Domain Matrices and Knowledge Maps for Visualizing Knowledge-Driven Scenarios. 15th International Dependency and Structure Modelling Conference, DSM 2013 Melbourne, Australia, 2013.

SCHUH 1988

Schuh, G.: Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten. Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten. Dissertation, RWTH, Aachen (1988).

SCHUH 2005

Schuh, G.: Produktkomplexität managen. Mit CD-ROM: Strategien-Methoden-Tools. Hanser Verlag 2005. ISBN: 3446400435.

SCHUH & SCHWENK 2001

Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. 1. Aufl. Auflage. München: Hanser Fachbuch 2001. ISBN: 978-3446187795.

SIMPSON & D'SOUZA 2004

Simpson, T. W.; D'Souza, B. S.: Assessing Variable Levels of Platform Commonality Within a Product Family Using a Multiobjective Genetic Algorithm. Concurrent Engineering 12 (2004) 2

SOSA et al. 2007

Sosa, M. E.; Browning, T. R.; Mihm, J.: Dynamic, DSM-Based Analysis of Software Product Architectures. In:Lindemann, U. et al. (Hrsg.): 9th International DSM Conference, Munich, 16.-18.10.2008. Aachen: Shaker 2007, S. 349-461. ISBN: 978-3-8322-6641-7.

SOSA et al. 2000

Sosa, M. E.; Eppinger, S. D.; Rowles, C. M.: Designing modular and integrative systems. ASME Design Engineering Technical Conferences - 12th International Conference on Design Theory and Methodology. Baltimore, 2000.

SOSA et al. 2004

Sosa, M. E.; Eppinger, S. D.; Rowles, C. M.: The Misalignment of Product Architecture and Organizational Structure in Complex Product Development. Management Science 50 (2004) 4

STEWARD 1981

Steward, D. V.: The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. IEEE Transactions on Engineering Management 28 (1981) 3, S. 71-74.

STEWARD 2007

Steward, D. V.: DSM – Where It's Been – Where It Needs to Go. In:Lindemann, U. et al. (Hrsg.): 9th International DSM Conference, Munich, 16.-18.10.2008. Aachen: Shaker 2007, S. 25-31. ISBN: 978-3-8322-6641-7.

STONE et al. 1998

Stone, R.; Wood, K.; Crawford, R.: A Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product. Design Engineering Technical Conferences. 1998.

STONE et al. 2000

Stone, R.; Wood, K.; Crawford, R.: A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies* 21 (2000) S. 5-31.

THEVENOT & SIMPSON 2007

Thevenot, J. H.; Simpson, T. W.: A comprehensive metric for evaluating component commonality in a product family. *Journal of Engineering Design* 18 (2007) 6, S. 577-598.

ULLMAN 1992

Ullman, D. G.: *The mechanical design process*. McGraw-Hill New York 1992.

ULRICH et al. 2001

Ulrich, H.; Probst, G. J. B.; der Systemorientierten Managementlehre, S. F.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte*. Haupt 2001.

ULRICH 1995

Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy* 24 (1995) 3, S. 419-440.

ULRICH & TUNG 1991

Ulrich, K.; Tung, K.: *Fundamentals of Product Modularity*. Sloan School of Management, M. I. o. T., 1991

ULRICH & EPPINGER 2004

Ulrich, S. D.; Eppinger, K. T.: *Product Design and Development*. 3. Auflage. New York: McGraw-Hill 2004. ISBN: 007-123273-7.

VAN-EIKEMA-HOMMES 2008

Van-Eikema-Hommes, Q.: Comparison and application of metrics that define the components modularity in complex products. *ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. New York, 2008.

VICKERY et al. 2015

Vickery, S. K.; Koufteros, X.; Dröge, C.; Calantone, R.: Product Modularity, Process Modularity, and New Product Introduction Performance: Does Complexity Matter? *Production and Operations Management* (2015)

WEBER 2005

Weber, C.: What Is 'Complexity'? In: Samuel, A. L., William (Hrsg.): *ICED 05: 15th International Conference on Engineering Design: Engineering Design and the Global Economy*, Melbourne, Australia, The Design Society ISBN: 9780858257887.

WHITNEY et al. 1999

Whitney, D. E.; Dong, Q.; Judson, J.; Mascoli, G.: Introducing Knowledge-based Engineering into an Interconnected Product Development Process. *ASME Design Engineering Technical Conferences - Design Theory and Methodology (DETC/DTM)*. Las Vegas, 1999.

WILDEMANN 1998

Wildemann, H.: *Komplexitätsmanagement durch Prozess- und Produktgestaltung*. In: in: Adam, D. H. K., *Schriften zur Unternehmensführung Band 61*, Wiesbaden 1998, S. 47-68. (Hrsg.): 1998.

WILDEMANN 2005

Wildemann, H.: Variantenmanagement - Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess. 13. Auflage Auflage. München: TCW, Transfer-Centrum-Verlag 2005. ISBN: 3-929918-17-X.

WILDEMANN et al. 2007

Wildemann, H.; Ann, C.; Broy, M.; Günthner, W. A.; Lindemann, U.: Plagiatschutz - Handlungsspielräume der produzierenden Industrie gegen Produktpiraterie. München: TCW Transfer-Centrum 2007. ISBN: 978-3-937236-63-6. (Forschungsbericht).

YU et al. 2003

Yu, T.; Yassine, A.; Goldberg, D.: A genetic algorithm for developing modular product architectures. ASME Design Engineering Technical Conferences. 2003.

YU et al. 2007

Yu, T.; Yassine, A.; Goldberg, D.: An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms. Research in Engineering Design 18 (2007) 2, S. 91-109.

ZAGEL 2010

Zagel, M.: Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstrukturoptimierung. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2010. ISBN: 9783939432265.

ZAMIROWSKI & OTTO 1999

Zamirowski, E.; Otto, K.: Identifying product portfolio architecture modularity using function and variety heuristics. ASME 11th International Conference on Design Theory and Methodology. Las Vegas, 1999.

9. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode. München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1978.

- D11 HEISIG, R.:
Längencodierer mit Hilfsbewegung.
München: TU, Diss. 1979.
- D12 KIEWERT, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60).
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985. Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:
Konstruieren als gedanklicher Prozess.
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMANN, H. J.:
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gussgehäusen.
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.
München: TU, Diss. 1987.

- D25 FIGEL, K.:
Optimieren beim Konstruieren.
München: Hanser 1988. Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.

Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1). Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2). Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSTEINER, H.-J.:
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3). Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluss an ein CAD-System.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.
Datenbankgestützte Teileverwaltung und Wiederholteilsuche.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D32 NEESE, J.:
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:
Systematischer Entwicklungsprozess am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D38 LENK, E.:
Zur Problematik der technischen Bewertung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D40 SCHIEBELER, R.:
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25). Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.: MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPPOULIS, A.:
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27). Zugl. München: TU, Diss. 1996.

- D53 STEINMEIER, E.:
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D55 GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIRSACK, H.:
Methode für Krafteinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖSSER, R.:
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36). Zugl. München: TU, Diss. 1999.

Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der
Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D64 ASSMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40). Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D67 STETTER, R.:
Method Implementation in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:
Modell der Methoden- und Hilfsmiteleinführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D69 COLLIN, H.:
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:
Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradunggerechte Produkte.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003.
- D81 GRAMANN, J.:
Problemmodelle und Bionik als Methode.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55). Zugl. München: TU, Diss. 2004.

- D82 PULM, U.:
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D83 HUTTERER, P.:
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 58). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D85 PACHE, M.:
Sketching for Conceptual Design.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:
Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 61). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 62). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D89 STRICKER, H.:
Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 63). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D90 NIBL, A.:
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 64). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D91 MÜLLER, F.:
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 65). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D92 ERDELL, E.:
Methodenanwendung in der Hochbauplanung – Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 66). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D93 GAHR, A.:
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D94 RENNER, I.:
Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung) Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D95 PONN, J.:
Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung) Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D96 HERFELD, U.:
Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 70). Zugl. München: TU, Diss. 2007.

- D97 SCHNEIDER, S.:
Model for the evaluation of engineering design methods.
München: Dr. Hut 2008 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D98 FELGEN, L.:
Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D99 GRIEB, J.:
Auswahl von Werkzeugen und Methoden für verteilte Produktentwicklungsprozesse.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D100 MAURER, M.:
Structural Awareness in Complex Product Design.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D101 BAUMBERGER, C.:
Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D102 KEIJZER, W.:
Wandlungsfähigkeit von Entwicklungsnetzwerken – ein Modell am Beispiel der Automobilindustrie.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D103 LORENZ, M.:
Handling of Strategic Uncertainties in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2008.
- D104 KREIMEYER, M.:
Structural Measurement System for Engineering Design Processes.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D105 DIEHL, H.:
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D106 DICK, B.:
Untersuchung und Modell zur Beschreibung des Einsatzes bildlicher Produktmodelle durch Entwicklerteams in der Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D107 GAAG, A.:
Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D108 ZIRKLER, S.:
Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D109 LAUER, W.:
Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D110 MEIWALD, T.:
Konzepte zum Schutz vor Produktpiraterie und unerwünschtem Know-how-Abfluss.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D111 ROELOFSEN, J.:
Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.

- D112 PETERMANN, M.:
Schutz von Technologiewissen in der Investitionsgüterindustrie.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D113 GORBEA, C.:
Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis in a New Age of Architectural Competition.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D114 FILOUS, M.:
Lizenzierungsgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden zur Integration lizenzierungsrelevanter Aktivitäten in Produktentstehungsprozessen des Maschinen- und Anlagenbaus.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D115 ANTON, T.:
Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D116 KESPER, H.:
Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden.
München: Dr. Hut 2012 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2012.
- D117 KIRSCHNER, R.:
Methodische Offene Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2012.
- D118 HEPPERLE, C.:
Planung lebenszyklusgerechter Leistungsbündel.
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.
- D119 HELLENBRAND, D.:
Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse.
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.
- D120 EBERL, T.:
Charakterisierung und Gestaltung des Fahr-Erlebens der Längsführung von Elektrofahrzeugen.
München: TU, Diss. 2014.
- D121 KAIN, A.:
Methodik zur Umsetzung der Offenen Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D122 ILIE, D.:
Systematisiertes Ziele- und Anforderungsmanagement in der Fahrzeugentwicklung.
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.
- D123 HELTEN, K.:
Einführung von Lean Development in mittelständische Unternehmen - Beschreibung, Erklärungsansatz und Handlungsempfehlungen.
München: Dr. Hut 2015 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D124 SCHRÖER, B.:
Lösungskomponente Mensch. Nutzerseitige Handlungsmöglichkeiten als Bausteine für die kreative Entwicklung von Interaktionslösungen.
München: TU, Diss. 2014.
- D125 KORTLER, S.:
Absicherung von Eigenschaften komplexer und variantenreicher Produkte in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.

- D126 KOHN, A.:
Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D127 FRANKE, S.:
Strategieorientierte Vorentwicklung komplexer Produkte – Prozesse und Methoden zur zielgerichteten Komponentenentwicklung am Beispiel Pkw.
Göttingen: Cuvillier, E 2014. Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D128 HOOSHMAND, A.:
Solving Engineering Design Problems through a Combination of Generative Grammars and Simulations.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D129 KISSEL, M.:
Mustererkennung in komplexen Produktportfolios.
München: TU, Diss. 2014.
- D130 NIES, B.:
Nutzungsgerechte Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems für Plug-In Hybride.
München: TU, Diss. 2014.
- D131 KIRNER, K.:
Zusammenhang zwischen Leistung in der Produktentwicklung und Variantenmanagement – Einflussmodell und Analyseverfahren.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D132 BIEDERMANN, W.:
A minimal set of network metrics for analysing mechatronic product concepts.
München: TU, Diss. 2015.
- D133 SCHENKL, S.:
Wissensorientierte Entwicklung von Produkt-Service-Systemen.
München: TU, Diss. 2015.
- D134 SCHRIEVERHOFF, P.:
Valuation of Adaptability in System Architecture.
München: Dr. Hut 2015 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D135 METZLER, T.:
Models and Methods for the Systematic Integration of Cognitive Functions into Product Concepts.
München: Dr. Hut 2016 (Reihe Produktentwicklung).
- D136 DEUBZER, F.:
A Method for Product Architecture Management in Early Phases of Product Development.
München: TU, Diss. 2016.
- D137 SCHÖTTL, F.:
Komplexität in sozio-technischen Systemen - Methodik für die komplexitätsgerechte Systemgestaltung in der Automobilproduktion.
München: Dr. Hut 2016 (Reihe Produktentwicklung).
- D138 BRANDT, L. S.:
Architekturgesteuerte Elektrik/Elektronik Baukastenentwicklung im Automobil
München: TU, Diss. 2017.
- D139 BAUER, W.:
Planung und Entwicklung änderungsrobuster Plattformarchitekturen
München: Dr. Hut 2016 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2016.

- D140 ELEZI, F.:
Supporting the Design of Management Control Systems In Engineering Companies from Management Cybernetics Perspective
München: TU, Diss. 2015.
- D141 BEHNCKE, F. G. H.:
Beschaffungsgerechte Produktentwicklung – Abstimmung von Produktarchitektur und Liefernetzwerk in frühen Phasen der Entwicklung
TU München: 2015. (als Dissertation eingereicht)
- D142 ÖLMEZ, M.:
Individuelle Unterstützung von Entscheidungsprozessen bei der Entwicklung innovativer Produkte.
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D143 SAUCKEN, C. C. v.:
Entwicklerzentrierte Hilfsmittel zum Gestalten von Nutzererlebnissen.
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D144 KASPEREK, D.:
Structure-based System Dynamics Analysis of Engineering Design Processes
München: TU, Diss. 2016.
- D145 LANGER, S. F.:
Kritische Änderungen in der Produktentwicklung – Analyse und Maßnahmenableitung
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D146 HERBERG, A. P.:
Planung und Entwicklung multifunktionaler Kernmodule in komplexen Systemarchitekturen und –portfolios – Methodik zur Einnahme einer konsequent modulzentrierten Perspektive
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D147 HASHEMI FARZANEH, H.:
Bio-inspired design: Ideation in collaboration between mechanical engineers and biologists
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D148 HELMS, M. K.:
Biologische Publikationen als Ideengeber für das Lösen technischer Probleme in der Bionik
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D149 GÜRTLER, M. R.:
Situational Open Innovation – Enabling Boundary-Spanning Collaboration in Small and Medium-sized Enterprises
München: TU, Diss. 2016.
- D150 WICKEL, M. C.:
Änderungen besser managen – Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D151 DANILIDIS, C.:
Planungsleitfaden für die systematische Analyse und Verbesserung von Produktarchitekturen
München: TU, Diss. 2017.
- D152 MICHAILIDOU, I.:
Design the experience first: A scenario-based methodology for the design of complex, tangible consumer products
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D153 SCHMIDT, D.M.:
Increasing Customer Acceptance in Planning Product-Service Systems
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)

D154 ROTH, M.:
Efficient Safety Method Kit for User-driven Customization
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)